

Şişme ve Dispersif Karakteristikteki Kil Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Çimento  
ve Zeolitin (Doğal Puzolan) Etkisi

Pınar Vural

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2012

The Effect of Cement and Zeolite (Natural Pozzolan) on Engineering Properties of Clay  
Soils with Swell and Dispersive Characteristics

Pınar Vural

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Civil Engineering

May 2012

Şişme ve Dispersif Karakteristikteki Kil Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Çimento ve Zeolitin (Doğal Puzolan) Etkisi

Pınar Vural

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ

Mayıs 2012

## ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Pınar Vural'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Şişme ve Dispersif Karakteristikteki Kil Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Çimento ve Zeolitin (Doğal Puzolan) Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ (Danışman)

**Üye** : Prof. Dr. Hasan TOSUN

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. D. Volkan OKUR

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Evren SEYREK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü



## ÖZET

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında proje sahalarındaki zeminler bazı durumlarda arzu edilen özellik ve kalitede değildir. Bu zeminler zayıf, şişebilen, dispersif, ileri derecede sıkışabilir nitelikte ve yüksek derecede geçirgen olabilirler. Mühendislik yapılarında neden oldukları hasarlar nedeniyle, şişen ve dispersif zeminlerin farklı içerikli katkıları kullanılarak iyileştirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar uzun yıllardan beri yapılmaktadır. Bundan önceki çalışmalarda problemlili zeminlerin katkılarıyla iyileştirilmesi ya şişme potansiyeli ya da dispersibilite açısından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak yüksek şişme potansiyeline ve dispersibilite özelliğine sahip Afyon ve Urfa bölgelerine ait killerin çimento ve zeolit (doğal puzolan) ile aynı anda hem şişme hem de dispersibilite özelliklerine ilaveten dayanım parametrelerine olan etkileri de araştırılmıştır.

Bu kapsamda, farklı oranlarda doğal zeolit ile karıştırılmış çimento katkısının kil zeminlerin şişme potansiyeli ve dispersibilite karakteristikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çimento yüzdesi (%3) sabit tutularak farklı yüzdelerde doğal zeolit kuru ağırlığın yüzdesi olarak (% 1, 3, 6, 10, 15 ve 20) dört farklı kil zemin numuneleri ile karıştırılmıştır. Öncelikli olarak zemin numunelerinin fiziksel özellikleri belirlenmiş ve daha sonra da kompaksiyon karakteristiklerinde sıkıştırılarak hazırlanan katkılı ve katkısız örnekler üzerinde; şişme yüzdesi, şişme basıncı, serbest basınç, dağılma ve iğne deliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım deneyleri sonucunda kil tipine ve kür süresine bağlı olarak dayanım parametrelerinde önemli artışlar belirlenmiştir. Sonuç olarak, dispersif özelliğe ve şişme potansiyeline sahip bu kil zemin numunelerinin çimento ve doğal zeolit karışımı ile etkili bir şekilde iyileştirilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Şişen Zemin, Dispersif Zemin, Dayanım, Stabilizasyon, Zeolit, Çimento.

## SUMMARY

In Geotechnical engineering applications in the project area soils in some cases, quality is not a desirable feature. They might be weak, expanable, in highly compressible and permeable. Because expansive and dispersive soils damage in engineering structures, extensive studies on using additives to ameliorate the effects of these soils have been conducted. In the previous studies have been evaluated in terms of swelling or dispersibility. In this study, as a different from other studies, the effect of cement and zeolite (natural pozzolana) has been searched on swelling, dispersibility and strenght characteristics of clay soils that having high sweeling potential and dispersibility characteristic which is belongs to province of Afyon and Urfa.

In this context, the effect of cement and natural zeolite additives on the characteristic of dispersibility and swelling potential of clay soils were investigated. Fixed percentage of cement (3%), plus different percentages of natural zeolite (1, 3, 6, 10, 15, and 20 %) were mixed with four different clay soil samples. First, the physical properties of the soil samples were determined. Next, the swell percentage, swell pressure, uniaxial compression test, crumb and pinhole tests were performed on samples with and without the additive by compressing the sample to achieve standard Proctor compaction characteristics. It was determined that strength parameters improved on uniaxial test result depending on clay type and curing time. As a result of this study, it is shown that these clay soil samples with swelling potential and dispersive characteristics can be effectively improved using natural zeolite combined with cement.

Keywords: Swelling Soil, Dispersive Soil, Strength, Stabilization, Zeolite, Cement.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren, yardımlarını esirgemeyen ve büyük bir sabır gösteren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Murat TÜRKÖZ 'e sonsuz şükran, teşekkür ve en derin saygılarımı sunarım.

Yapmış oldukları yardımlardan dolayı Eskisehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarından Yrd. Doç. Dr. Hasan SAVAŞ'a, tekniker Eyüp ERTAŞ'a teşekkür ederim. Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bana göstermiş oldukları anlayış, destek ve sabırdan dolayı canım aileme teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |            |
|--|------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                    | <b>v</b>   |
| <b>SUMMARY .....</b>                                 | <b>vi</b>  |
| <b>TEŞEKKÜR .....</b>                                | <b>vii</b> |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>                          | <b>xii</b> |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>                        | <b>xvi</b> |
| <br>   |            |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                | <b>1</b>   |
| 1.1. Genel.....                                      | 1          |
| 1.2. Amaç.....                                       | 3          |
| 1.3. Kapsam .....                                    | 3          |
| <br>   |            |
| <b>2. KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ .....</b> | <b>5</b>   |
| 2.1. Kil Zeminlerin Mineral Yapısı .....             | 6          |
| 2.2. Kil Minerallerinin Mineralojik Yapıları .....   | 11         |
| 2.2.1. Kaolinit grubu .....                          | 12         |
| 2.2.2. Monmorillonit grubu.....                      | 14         |
| 2.2.3. İllit grubu .....                             | 16         |
| 2.2.4. Klorit grubu.....                             | 16         |
| 2.3. Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri .....      | 17         |
| 2.3.1. Spesifik yüzey alanı .....                    | 17         |
| 2.3.2. Elektriksel iletkenlik .....                  | 17         |
| 2.3.3. pH değeri.....                                | 18         |
| 2.3.4. Katyon değişim kapasitesi .....               | 18         |
| 2.4. Kil Minerallerinin Tanımlanması .....           | 20         |
| 2.5. Kil Minerallerinin Sınıflandırılması .....      | 22         |
| <br>   |            |
| <b>3. PROBLEMLİ KİL ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE</b>   |            |
| <b>SINIFLANDIRILMASI .....</b>                       | <b>24</b>  |

## İÇİNDEKİLER (devam)

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 3.1. Şişen Zeminlerin Tanımlanması .....                            | 24                  |
| 3.1.1. Tanımlama deneyleri .....                                    | 27                  |
| 3.1.1.1. Zemin sınıflandırma deneyleri.....                         | 27                  |
| 3.1.1.2. Mineralojik yöntemler .....                                | 28                  |
| 3.1.1.3. Katyon değişim kapasitesi .....                            | 29                  |
| 3.1.1.4. Serbest şişme.....   | 30                  |
| 3.1.1.5. Potansiyel hacim değişimi .....                            | 31                  |
| 3.1.1.6. Şişme indeksi deneyi .....                                 | 32                  |
| 3.1.1.7. Kaliforniya taşıma oranı .....                             | 33                  |
| 3.1.1.8. Doğrusal genişleyebilirlik katsayısı.....                  | 33                  |
| 3.1.2. Şişen zeminlerin sınıflandırılması .....                     | 34                  |
| 3.1.2.1. Zemin sınıflandırma yöntemlerine göre sınıflandırma .....  | 35                  |
| 3.1.2.2. Mühendislik indeks özelliklerine göre sınıflandırma .....  | 35                  |
| 3.1.3. Şişen zeminlere etki eden faktörler.....                     | 38                  |
| 3.2. Dispersif Zeminler .....                                       | 40                  |
| 3.2.1. Dispersif zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılması ..... | 43                  |
| 3.2.1.1. Fiziksel deneyler .....                                    | 44                  |
| 3.2.1.2. Kimyasal deneyler .....                                    | 46                  |
| 3.2.1.3. Deneylerin değerlendirilmesi.....                          | 47                  |
| 3.2.2. Dispersibilitiyi etkileyen faktörler .....                   | 50                  |
| 3.2.2.1. Kıvam karakteristikleri ve kil muhtevası.....              | 51                  |
| 3.2.2.2. Kilin mineralojik yapısı .....                             | 51                  |
| 3.2.2.3. Erozyona neden olan sudaki çözülmüş tuzlar .....           | 52                  |
| 3.2.2.4. Sıklık ve su muhtevası .....                               | 53                  |
| <b>4. PROBLEMLİ KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU.....</b>              | <b>55</b>           |
| 4.1. Dispersif Zeminlerin Stabilizasyonu .....                      | 55                  |
| 4.2. Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu .....                          | 57                  |

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.1. Kimyasal katkı maddeleri .....                        | 58        |
| 4.2.2. Ön ıslatma .....                                      | 61        |
| 4.2.3. Sıkıştırma kontrolü ile zemin iyileştirme.....        | 61        |
| 4.2.3.1. Kaldırıp yeniden yerleştirme .....                  | 61        |
| 4.2.3.2. Örseleyip yeniden sıkıştırma .....                  | 62        |
| 4.2.4. Sürsaj yüklemesi .....                                | 62        |
| 4.2.5. Isı ile iyileştirme .....                             | 62        |
| 4.2.6. Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirmesi.....  | 62        |
| 4.2.7. Su muhtevasının korunması ile zemin iyileştirme ..... | 62        |
| 4.3. Zeolitin Yapısı ve Üretimi .....                        | 63        |
| 4.3.1. Zeolit katkısı ile çalışmalar .....                   | 66        |
| 4.3.2. Zeolitin kullanım alanları.....                       | 68        |
| 4.3.3. Zeolitin inşaat sektöründe kullanım alanları.....     | 69        |
| <b>5. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>                             | <b>72</b> |
| 5.1. Malzeme.....  | 72        |
| 5.1.1. Çalışmada kullanılan katkıların özellikleri .....     | 76        |
| 5.2. Yöntem.....   | 76        |
| 5.2.1. Elek analizi .....                                    | 76        |
| 5.2.2. Kıvam limitleri.....                                  | 77        |
| 5.2.2.1. Likit limit deneyi .....                            | 78        |
| 5.2.2.2. Plastik limit deneyi .....                          | 78        |
| 5.2.3. Özgül gravite deneyi.....                             | 78        |
| 5.2.4. Standart proktor kompaksiyon deneyi .....             | 79        |
| 5.2.5. Şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri .....        | 80        |
| 5.2.5.1. Şişme yüzdesi .....                                 | 80        |
| 5.2.5.2. Şişme basıncı .....                                 | 81        |
| 5.2.6. Dispersibilite deneyleri .....                        | 82        |
| 5.2.6.1 Dağılma deneyi .....                                 | 82        |

## İÇİNDEKİLER (devam)

|  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--|---------------------|
| 5.2.6.2. İğne deliği deneyi.....                       | 83                  |
| 5.2.7. Serbest basınç deney .....                      | 84                  |
| 5.2.8. XRD Deneyleri .....                             | 87                  |
| <b>6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>            | <b>88</b>           |
| 6.1. Şişme Deney Sonuçları.....                        | 88                  |
| 6.1.1. Şişme yüzdesi deney sonuçları .....             | 89                  |
| 6.1.2. Şişme basıncı deney sonuçları .....             | 98                  |
| 6.2. Dispersibilite Deney Sonuçları .....              | 108                 |
| 6.2.1. Dağılma deney sonuçları .....                   | 109                 |
| 6.2.2. İğne deliği deney sonuçları .....               | 112                 |
| 6.3. Serbest Basınç Deney Sonuçları .....              | 118                 |
| <b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                   | <b>123</b>          |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                 | <b>125</b>          |
| <br>   |                     |
| <b>EKLER</b>   |                     |
| <b>Ek.1. Örneklerin Kıvam Limiti Deney Sonuçları</b>   |                     |
| <b>Ek.1. Örneklerin Kompaksiyon Deney Sonuçları</b>    |                     |
| <b>Ek.1. Örneklerin Dağılma Deney Sonuçları</b>        |                     |
| <b>Ek.4. Örneklerin Serbest Basınç Deney Sonuçları</b> |                     |
| <b>Ek.5. Örneklerin XRD Deney Sonuçları</b>            |                     |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 2.1. Kil minerallerini oluşturan silika ünitesi .....                          | 8            |
| Şekil 2.2. Kil minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi.....                        | 8            |
| Şekil 2.3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi .....         | 10           |
| Şekil 2.4. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi .....          | 11           |
| Şekil 2.5. Kaolinit kilinin yapısı .....   | 13           |
| Şekil 2.6. Kaolinit kilinin elektron mikroskop fotoğrafı .....                       | 14           |
| Şekil 2.7. Montmorillonit kilinin yapısı.....  | 14           |
| Şekil 2.8. Montmorillonit kilinin elektron mikroskop fotoğrafı.....                  | 15           |
| Şekil 2.9. İllit kilinin yapısı .....  | 16           |
| Şekil 2.10. Kil-elektrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı .....        | 20           |
| Şekil 3.1. Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki.....                | 28           |
| Şekil 3.2. Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme .....                  | 31           |
| Şekil 3.3. Kil oranı-Aktivite değerlerine bağlı sınıflandırma .....                  | 37           |
| Şekil 3.4. Dispersiyon oluşumuna sodyum etkisinin şematik gösterimi .....            | 42           |
| Şekil 3.5. Kalsiyum katyonunun topaklanmış yapı oluşumuna etkisi .....               | 42           |
| Şekil 3.6. Kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler.....                          | 43           |
| Şekil 3.7. Dağılma deneyi sonucunda karşılaşılan durumlar .....                      | 45           |
| Şekil 3.8. Dispersibilite ve boşluk suyundaki çözülmüş tuzlar arasındaki ilişki..... | 47           |
| Şekil 3.9. Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi .....        | 49           |
| Şekil 3.10. İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi .....    | 50           |
| Şekil 3.11 Bir kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler.....                      | 53           |



## ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)

| <u>Şekil</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 4.1. Killi bir zeminde kireç stabilizasyonu sonucu meydana gelen geoteknik değişimler..... | 60           |
| Şekil 4.2. Zeolit.....   | 64           |
| Şekil 4.3. Zeolitin tarım alanında kullanılması.....   | 69           |
| Şekil 5.1. Numunelere ait tane dağılımı eğrileri.....  | 74           |
| Şekil 5.2. Numunelerin kompaksiyon eğrileri.....   | 75           |
| Şekil 5.3. Özgül ağırlık deneyinde vakum uygulaması ve tartma işlemi .....                       | 79           |
| Şekil 5.4. Şişme basıncı ve şişme yüzdesi deformasyon saatleri82                                 |              |
| Şekil 5.5. Dispersibilite deneyi uygulaması.....   | 83           |
| Şekil 5.6. İğne deliği deney düzeneği .....  | 84           |
| Şekil 5.7. İğne deliği deneyinde kullanılan tasarım kartı .....                                  | 85           |
| Şekil 5.8. Serbest basınç deneyi ve sonuçları .....  | 86           |
| Şekil 5.9. Serbest basınç deney sonuçlarını gösteren mohr dairesi ve mukavemet Zarfı .....       | 86           |
| Şekil 5.10. Serbest basınç deneyi.....   | 87           |
| Şekil 6.1. Numune 1 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi .....                                      | 90           |
| Şekil 6.2. Numune 1'ye ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi..... | 91           |
| Şekil 6.3. Numune 2 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi .....                                      | 92           |
| Şekil 6.4. Numune 2'ye ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi..... | 93           |
| Şekil 6.5. Numune 3 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi .....                                      | 94           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

| <u>Şekil</u>   | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 6.6. Numune 3'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme yüzdesi değişimi.....   | 95           |
| Şekil 6.7. Numune 4 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi .....                                    | 96           |
| Şekil 6.8. Numune 4'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme yüzdesi değişimi.....   | 97           |
| Şekil 6.9. Numune 1'e ait şişme basıncı zaman ilişkisi.....                                    | 99           |
| Şekil 6.10. Numune 1'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi.....  | 100          |
| Şekil 6.11. Numune 2'ye ait şişme basıncı zaman ilişkisi.....                                  | 101          |
| Şekil 6.12. Numune 2'ye ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi..... | 102          |
| Şekil 6.13. Numune 3'e ait şişme basıncı zaman ilişkisi.....                                   | 103          |
| Şekil 6.14. Numune 3'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi.....  | 104          |
| Şekil 6.15. Numune 4'e ait şişme basıncı zaman ilişkisi.....                                   | 105          |
| Şekil 6.16. Numune 4'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi.....  | 106          |
| Şekil 6.17. Numunelerin dönüştürülmüş plastisite kartındaki yerleri .....                      | 107          |
| Şekil 6.18. Şişme potansiyeli sınıflama kartı.....   | 108          |
| Şekil 6.19. Numune 1'e ait dağılma deney sonuçları .....                                       | 109          |
| Şekil 6.20. Numune 2'ye ait dağılma deney sonuçları .....                                      | 110          |
| Şekil 6.21. Numune 3'e ait dağılma deney sonuçları .....                                       | 111          |
| Şekil 6.22. Numune 4'e ait dağılma deney sonuçları .....                                       | 111          |
| Şekil 6.23. Numune 1 iğne deliği deney sonuçları .....   | 113          |

**ŞEKİLLER DİZİNİ (Devamı)**

| <b><u>Şekil</u></b>   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| Şekil 6.24. Numune 2 iğne deliği deney sonuçları .....  | 114                 |
| Şekil 6.25. Numune 3 iğne deliği deney sonuçları .....  | 115                 |
| Şekil 6.26. Numune 4 iğne deliği deney sonuçları .....  | 116                 |
| Şekil 6.27. Serbest basınç deneyi sonucunda Numune 2'den bir görünüm.....                         | 119                 |
| Şekil 6.28. Numune 1 için kür süresine bağlı katkı yüzdesi serbest basınç dayanımı ilişkisi ..... | 120                 |
| Şekil 6.29. Numune 1 için kür süresine bağlı katkı yüzdesi serbest basınç dayanımı ilişkisi ..... | 120                 |
| Şekil 6.30. Numune 1 için kür süresine bağlı katkı yüzdesi serbest basınç dayanımı ilişkisi ..... | 121                 |
| Şekil 6.31. Numune 1 için kür süresine bağlı katkı yüzdesi serbest basınç dayanımı ilişkisi ..... | 121                 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <b><u>Çizelge</u></b>   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| Çizelge 2.1. Bazı kil minerallerinin özellikleri.....   | 9                   |
| Çizelge 2.2. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta 1995).....   | 12                  |
| Çizelge 2.3. Kil minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi .....   | 22                  |
| Çizelge 2.4. Kil minerallerinin sınıflandırılması .....   | 23                  |
| Çizelge 3.1. Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri.....   | 26                  |
| Çizelge 3.2. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri .....  | 30                  |
| Çizelge 3.3. Şişme indeksi değerlerine göre zeminlerin şişme potansiyelleri.....  | 32                  |
| Çizelge 3.4 Şişme-büzülme potansiyelinin doğrusal genişleyebilirlik katsayısı ve<br>doğrusal genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması ..... | 34                  |
| Çizelge 3.5. Kolloid içeriği, plastisite indisi, büzülme limiti değerlerine göre şişen<br>zeminlerin sınıflandırılması .....                                  | 36                  |
| Çizelge 3.6. Rötire limiti veya lineer rötreye bağlı şişen zemin sınıflandırması.....   | 36                  |
| Çizelge 3.7. 200 No'lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve penetrasyon<br>direncine bağlı şişen zemin sınıflandırması.....                            | 36                  |
| Çizelge 3.8. Plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırması .....  | 37                  |
| Çizelge 3.9. Şişmeyi etkileyen faktörler .....  | 38                  |
| Çizelge 3.10. Deneylerin genel karşılaştırılması .....  | 48                  |
| Çizelge 4.1. Zeolit minerallerinin sınıflandırılması.....   | 65                  |
| Çizelge 5.1. Deneysel çalışma programı .....  | 73                  |
| Çizelge 5.2. Numunelerin tanımlama deney sonuçları .....  | 73                  |
| Çizelge 5.3. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları .....  | 74                  |
| Çizelge 5.4. Numunelerin kompaksiyon karakteristikleri .....  | 75                  |
| Çizelge 5.5. Kullanılan zeolitinin özellikleri .....  | 76                  |

**ÇİZELGELER DİZİNİ(DEVAMI)**

| <b><u>Çizelge</u></b>   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| Çizelge 5.6. Kullanılan Çimentonun özellikleri .....  | 77                  |
| Çizelge 6.1. Numune 1'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları ..... | 91                  |
| Çizelge 6.2. Numune 2'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları ..... | 93                  |
| Çizelge 6.3. Numune 3'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları ..... | 95                  |
| Çizelge 6.4. Numune 4'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları ..... | 97                  |
| Çizelge 6.5. Numune 1'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları .....   | 100                 |
| Çizelge 6.6. Numune 2'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları .....   | 102                 |
| Çizelge 6.7. Numune 3'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları .....   | 104                 |
| Çizelge 6.8. Numune 4'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları .....   | 106                 |
| Çizelge 6.9. Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılan dispersibilite deney sonuçları .....          | 118                 |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1. Genel

Yeryüzündeki zeminlerin bir bölümünü teşkil eden “şişen zeminler” ve “dispersif zeminler” geoteknik mühendisliğinde önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yıllık yağışın yıllık buharlaşmadan daha az olduğu, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde şişen zeminlere sıkça rastlanmaktadır. Şişen zeminler temel zemini olarak değerlendirildiklerinde, ıslanmaya bağlı olarak temel tabanında önemli ölçüde kaldırma basınçlarının oluşmasına neden olur. Islanma ve kuruma aşamalarında hacim değişikliği gösteren değişik kil tipleri bulunmaktadır. Özellikle kurak iklimli bölgelerde suya doymun olmayan killi zeminlerin su muhtevsındaki artış, önemli hacim değişikliklerini oluşturmaktadır. Bu tür zeminlerin su ile temas etmesi halinde meydana gelen hacim değişikliklerinin büyük olması ve oluşan hacim değişiminin üst yapı veya var olan mühendislik yapıları tarafından engellenmesi ile ortaya çıkan basınç, yapılarda büyük maddi hasara neden olmaktadır. Şişen zeminler üzerinde gerekli önlemler alınmadan inşa edilen binalar, karayolu, demiryolu ve havaalanı kaplamaları, sulama kanalları, barajlar, istinat duvarları gibi yapılarda önemli boyutlarda hasarlar oluşmaktadır. Dünyanın bir çok ülkesinde her yıl şişen zeminlerden dolayı milyarlarca dolarlık zarar meydana gelmektedir. Bu zararlar sel, kasırga ve deprem gibi doğal afetlerin oluşturduğu zararları dahi aşabilmektedir.

Suya doymun olmayan bazı kil zeminlerin su ile etkileşimde bulunarak bünyelerine su alması ve buna bağlı olarak gelişen hacim artışının karşılanması ile ortaya çıkacak aşırı basınç, kilin “şişme” özelliği olarak tanımlanmaktadır. Suyula temas ettiklerinde şişen bu zeminler çoğunlukla montmorillonit tipi kil minerali içeren zeminlerdir. Şişen zeminler Amerika, Kanada, İsrail, Güney Afrika, Avustralya,

Hindistan, Sudan, Peru, İspanya (Akawwi ve ark., 2001; Coduto, 2001; Popescu, 1979; Sridharan ve ark., 2004; Xeidakis vd., 2004), Ürdün Yunanistan, Kuzey Kıbrıs, Çin ve Romanya gibi ülkelerin yanı sıra Türkiye’de de bulunmaktadır. Türkiye’de şişen zeminlerin en yoğun olduğu illerden birisi Ankara’dır. Literatürde “ Ankara Kili” olarak bilinir. Şişme potansiyeli gösterdiği birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Birand, 1963; Ordemir ve ark., 1965; Doruk, 1968; Omay, 1970; Üner, 1977; Furtun, 1989; Cokça, 1991; Ergüler ve Ulusay, 2003a; Avşar vd., 2009).

Problemlili zeminler olarak tanımlanan şişen zeminler bu özellikleri nedeni ile birçok mühendislik yapısında ciddi problemlere neden olmaktadır. Bu tür durumlarda yapının ya da tesisin yerinin değiştirilmesi, istenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin uzaklaştırılarak yerine elverişli zeminlerin getirilmesi düşünülebilir. Ancak yapı ve yapının yerini çoğu zaman sadece geoteknik ölçütler değil, başka koşullarda belirlemede ve mühendis yapıyı belirlenen yerde tasarlamak durumunda kalmaktadır. Bunun için uygun çözümlerden biri, yapının temelini zemindeki geoteknik şartlara göre ayarlamak veya zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmektir. Bunlardan ekonomik olan bazen ikinci alternatif olabilir. Uygun olmayan zeminlerin stabilizasyonunda genel olarak mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal olmak üzere başlıca dört tür iyileştirme metodu kullanılır. Bu yöntemlerin uygulanması ile zayıf zeminin dayanımını artırmak ve oturmaları azaltma olanağı vardır.

Şişen zemin probleminin tanımlanması oldukça yenidir. İlk defa 1938 yılında ABD Su İşleri Teşkilatı (USBR) mühendisleri Oregon eyaletindeki Owyhee projesinde inşa edilen bir çelik sifon temelinde ters yönde çalışan yer değiştirmelerin oluştuğunu belirlemişlerdir (Chen, 1988). Bu olaydan sonra “şişen zemin” probleminin mekanizması tanımlanmış ve tasarım kriterleri önerilmiştir. Ancak bu tarihten sonra zemin üzerine direkt oturan beton yapıların inşasındaki hızlı artış, şişen zeminlerin neden olduğu hasarlarda da önemli seviyede artışa neden olmuştur. Bu artışta, temel zemininde yapılması gereken geoteknik çalışma eksikliğinin ve yetersiz yapılan çalışmaların da etkili olduğu belirtilmelidir (D.A. Jones and K.A. Jones, 1987). Ülkemizde inşa edilen hafif su yapılarında da oluşan bu tip problemler, genellikle

projeler kapsamında yer alan sulama yapıları inşaatında yaşanmıştır (Tosun ve Kırmızıtaş, 1993).

Kil zeminlerde görülen bir diğer problem ise zeminin dispersif özellik göstermesidir. Yapısal olarak stabil olmayan bu zeminler yavaş hareket eden su ile kolayca erozyona uğrayabilirler. Bu tür tahribata ilişkin çeşitli örnekler Amerika Birleşik Devletlerinden literatüre geçmiştir (Sherard vd., 1972; Mitchell, 1976). Böyle olayların görüldüğü toprak dolgular incelendiğinde, hepsinde dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminin dispersif kil daneleri içerdiği ve böyle danelerin akan su içerisinde kolaylıkla süspansiyona geçip taşındığı gözlenmiştir. Dispersif erozyonun oluşması için kilin mineralojisi ve kimyasal yapısı ile birlikte, dolgu içerisindeki boşluk suyu ve rezervuarın içerisindeki çözünmüş tuz muhtevasının niteliği ve miktarıda etkilidir.

## **1.2. Amaç**

Bu tez kapsamında, Afyon ve Urfa illerinden alınan yüksek şişme potansiyeline ve dispersibilite özelliğine sahip kil zemin üzerinde çalışılmıştır. Zemin üzerinde şişme ve dispersibilite özelliğinin çimento ve zeolit (doğal puzolan) ile iyileştirilmesi konusu incelenmiştir. Kilin sabit çimento ve farklı miktarlarda zeolit (doğal puzolan) ile stabilize edilmesi durumunda çeşitli geoteknik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak, çimento ve zeolit ve numunelere uygulanan kürlerin aynı anda zemin stabilizasyonu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

## **1.3. Kapsam**

Araştırma, Afyon ve Urfa illerinden alınan kil zeminlerin çimento ve zeolit (doğal puzolan) ile stabilizasyonu yönünde yapılan deneysel çalışmaları içermektedir. Bu amaç doğrultusunda tane dağılımı, özgül gravite, kıvam limitleri, kompaksiyon



deneyle, ŐŐme basıncı, ŐŐme yŐzdesi ve serbest basınc deneyi ile bunun yanında dispersibilite özelliklerinin belirlenmesi için de iğne deliği ve dağılma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca zeminlerin mineralojik yapısı da yapılan X-Ray deneyi ile incelenmiştir. Yapılan serbest basınc deneyi çerçevesinde, katkısız numuneler için hemen, diğer numuneler için hemen, 7 ve 28 gŐnlŐk kŐr sonunda serbest basınc dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda imento ve zeolitin zeminin ŐŐme, dispersibilite ve dayanım  zellikleri Őzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu g rŐlmŐŐtŐr.

## BÖLÜM 2

### KİL MİNERALLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Zemin mekaniğinde zeminler kaba taneli ve ince taneli olmak üzere iki grup altında incelenmektedir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre 0,075 mm tane çapı sınırı kaba ve ince taneli zeminlerin sınırı olup, 200 Nolu (<0,075 mm) eleğin altına geçen kısım ince taneli zeminler olarak adlandırılmaktadır. İnce taneli zeminler ise kil ve silt birimlerinden oluşmaktadır.

Kil zeminler açıklandığı gibi ince tanelidir. Fakat tüm ince taneli zeminler kohezyonlu veya kil olmak durumunda değildir. Siltler hem granüle hem de ince tanelidir. Kil taneciklerinde olduğu gibi münferit silt taneleri de çıplak gözle ayırt edilemezler; fakat, siltler kohezyonlu ve plastik değildirler. Çok ince taneli kohezyonsuz zeminlere bir diğer örnek de kaya unudur.

Kil; doğal olarak oluşmuş, başlıca ince taneli minerallerden meydana gelen, yeterli miktarda su katılınca genellikle plastikleşen ve kuruma veya pişme ile sertleşebilen malzemedir (Şengül, 2003). Doğada yaygın olarak bulunan killer, öncelikle tarım sektörünün temel taşlarından biri olmakla birlikte, pek çok endüstri dalında hammadde olarak kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde killerle temel mühendisliği, yapı malzemesi, baraj inşaatları, her türlü yapıda yapılabilecek kazı ve hafriyat çalışmaları gibi çok yaygın bir alanda karşılaşılmaktadır. Killerin doğal oluşum zorunluluğu nedeniyle sentetik malzemeler kil kapsamı dışında tutulur. Ayrıca çok miktarda organik madde içeren turba, bataklık çamuru ve bazı topraklar da kil kapsamı dışında tutulur. Organik maddeler kil içerisinde bulunabilir (Çetin, 2003).

Killer, düşük hidrolik iletkenlikleri ve yüksek adsorpsiyon kapasiteleri ile akla ilk gelen geçirimsiz tabaka malzemesidir. Bununla beraber, yapılan araştırmalar göstermiştir ki; killer sıcaklık ve su içeriği değişimlerinden oldukça fazla etkilenmekte;

geçirimsiz malzemede çatlaklar oluşmakta ve dolayısıyla mühendislik parametreleri de istenilen düzeyden uzaklaşmaktadır.

Kil mineralleri çok küçük partiküller olup, elektrokimyasal olarak çok aktiftirler. Bir zemin kütlesi içinde az miktarda dahi olsa kil minerallerinin varlığı o kütlenin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Kil miktarı arttıkça zeminin davranışı kilin özellikleri tarafından kontrol edilir. Kil içeriği yaklaşık %50 olduğu zaman kum ve silt taneleri aslında bir hamur içinde yüzen taneler gibidirler ve mühendislik davranışı üzerindeki etkileride çok düşüktür.

### **2.1. Kil Zeminlerin Mineral Yapısı**

Kil zeminler; kayaların ve maden kütlelerinin yavaş aşınmasıyla oluşurlar ve su ihtiva ederler. Kil mineralleri alüminyum, magnezyum ve demirin kompleks silikatlarıdır. Kil minerallerini iki basit kristal yapı oluşturur;

1. Silika-oksijen tetrahedron: Bu yapıda bir silika atomu dört oksijen atomu tarafından çevrelenmiştir. Tetrahedron birimler gibi silika tabakaları oluştururlar. Her tetrahedronda tabanda bulunan üç oksijen atomu komşu tetrahedron ile paylaşılır. Artı dört değerlikli her silika atomu, toplam eksi 8 değerlikli olan dört oksijen atomu ile bağlanır.
2. Alüminyum (veya magnezyum) oktahedral: Bu yapıda bir alüminyum veya magnezyum atomu altı hidroksil ünite ile çevrelenmiştir. Alüminyum oktahedral üniteleri birleşerek Gibsit tabakasını oluşturur. Eğer oktahedral üniteler içerisindeki metalik atomlar magnezyum ise Brusit tabakaları oluşur.

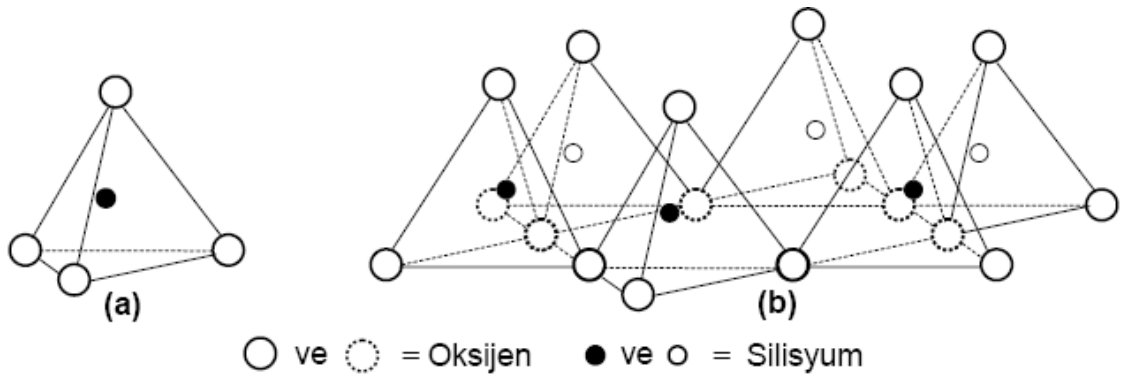
Silika tabakaları oktahedral tabakalar ile birleşirse oksijen atomları hidroksil atomları ile yer değiştirerek nötrleşmeye çalışır. Kil mineralleri iki veya üç tekrarlı tabakadan meydana gelmektedirler.

Kil mineralleri nispeten karışık yapılu kristaller şeklinde olup kristallerin arjmanına göre gruplandırılırlar ve aynı gruba ait mineraller de aşağı yukarı benzer özelliklerle birbirine bağlı olurlar. Alkali mineraller veya alkali metaller, kil minerallerinin esas bileşeni olarak killerin bileşiminde bulunurlar. Bazı killer tek bir kil mineralinden ibarettir. Killer içerisinde kil mineraline ek olarak, kuvars, kalsit, feldspat ve prit gibi kil olmayan yabancı maddelerde bulunabilir. Bazı killer organik maddeleri ve suda çözünebilen tuzları da içerirler. Killerin oluşturdukları ortamın ısı, basınç değeri ve ortamın asit dengesi meydana gelecek kil minerallerinin cinsini tayin etmektedir. Düşük ısı ve basınç altında ve asidik ortamda kaolinit tipi mineraller oluşmakta, halbuki alkali iyonu olarak potasyum mevcutsa ve bunun konsantrasyonu belli bir miktarın üzerinde ise montmorillonitin oluşmasına neden olur. 350°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ve orta dereceli bir basınç altında kaolinit yerine pyrofilite teşekkül eder. Daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda diğer alüminyumlu killer meydana gelir. Killerin kimyasal analizleri nadiren kil minerallerini birbirinden ayırabilmektedir, fakat X ışınları difraksiyonu ve diferansiyel termal analizler gibi yöntemlerle kil mineralleri birbirinden ayırt edilebilirler.

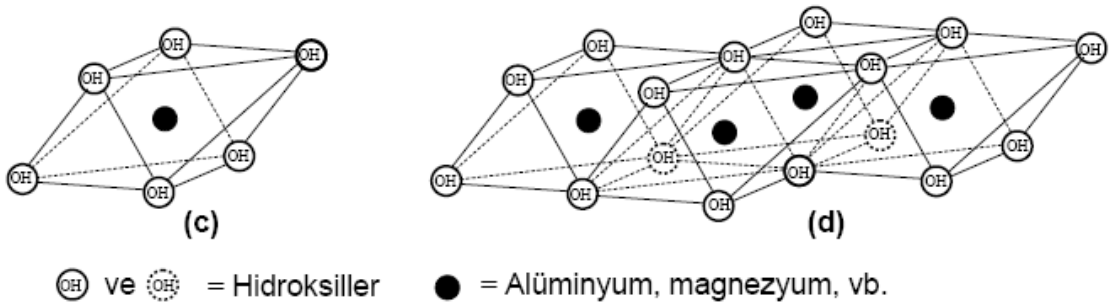
Killer çok nadir olarak saf halde bulunurlar. Diğer yabancı maddelerle karışık killerin fiziksel özellikleri, bu maddelerin etkisi sonucunda daha karmaşık bir hal alır. Fiziko kimyasal özellikler bakımından alkali bazlar, toprak alkalileri ve asitler killerin karakterlerini değiştirirler. Ayrıca killerin morfolojik koloidal karakterlerini de göz önünde bulundurmaya gerekir. Kolloidlik karakterleri özellikle montmorillonitlerde ve bentonitlerde bariz olarak görülmektedir. Bentonitler kendi ağırlıklarının 6-7 katı su ile şişerler ve jelliklerini arttırırlar. İlkel ayrışmalar sonucunda koloidal şekiller altında silisyum ve alüminyum serbest kalması mümkün olabilir. Silisyum negatif, alüminyum pozitif bir kolloid meydana getirir. Bunların serbest kalması sonucunda karşılıklı pıhtılaşma oluşur ve pıhtı gitgide yavaş fakat sürekli olarak alüminyum hidrosilikat kristaline dönüşür.

Kil minerali yapısında iki ana yapı bloğu vardır. Silis tetrahedronunda bir silisyum iyonu dört oksijen atomu ile şekil 2.1' de gösterildiği gibi birleşmiştir. İkinci elemenda alüminyum veya magnezyum iyonu altı hidroksil iyonu ile bağlı olup sekiz

yüzlü oktahedron oluşturmuştur (Şekil 2.2). Alüminyum oktahedronlarının oluşturduğu tabakalara “gibsit”, magnezyum oktahedronu oluşturduğu tabakalara ise “brusit” denir. Tetrahedronların oluşturduğu tabakaların kalınlığı  $4,63^{\circ}\text{A}$ . Oktahedronlar ise  $5,05^{\circ}\text{A}$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.1. Kıl minerallerini oluşturan silika ünitesi (tetrahedron) (Grim, 1959)  
a) Tetrahedron b) Tetrahedral tabaka



Şekil 2.2. Kıl minerallerini oluşturan alüminyum ünitesi (oktahedron) (Grim, 1959)  
c) Oktahedron d) Oktahedral tabaka

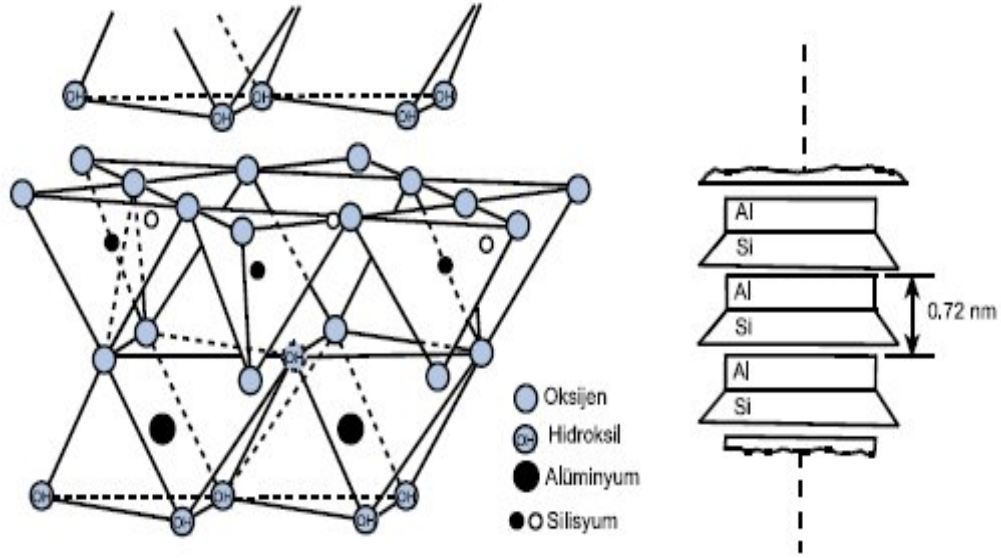
Kıl minerallerinin ayırımında; tabaka kalınlığı, tabakanın iyonik özelliği ve tabakaların üst üste diziliş düzeni kriterleri gözetilir.

Doğada en çok görülen kil mineralleri 1:1 tipindeki kaolinitler ve halloysit; 2:1 tipindeki montmorillonitler, illit ve vermikülitlerdir. Esasen diğer gruplar da bu minerallerle benzer özellikler vermektedirler. Değişiklik mineral yapısındaki iyon türü ve aradaki su moleküllerinden ileri gitmektedir. Çizelge 2.1' de çokça karşılaşılan ve özellikleri birbirinden çok farklı olan üç ana kil türünün ayrıntıları özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı kil minerallerinin özellikleri (Önalp, 1982)

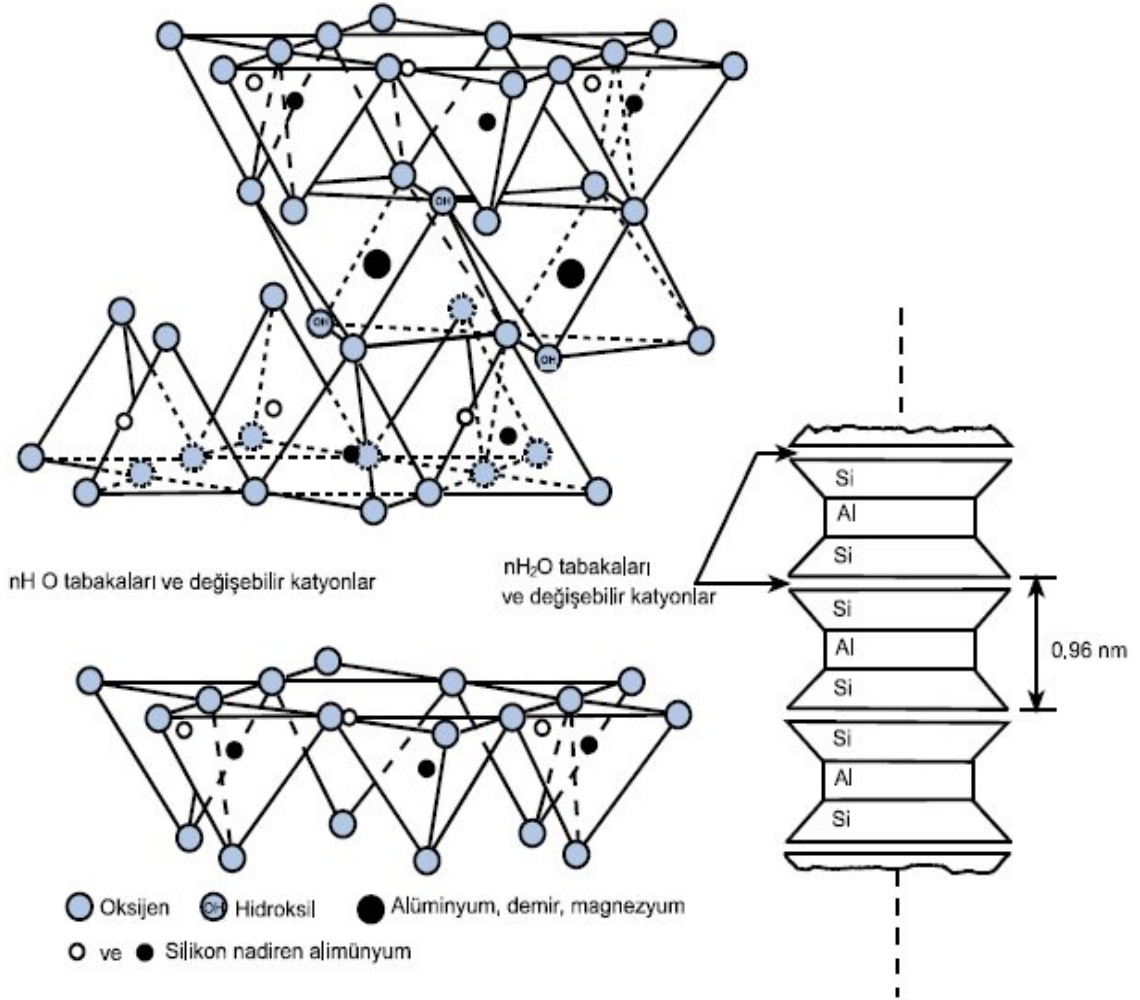
|                                  | <i>Montmorillonit</i> | <i>İllit</i> | <i>Kaolinit</i> |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| Tane Büyüklüğü                   | 10 A-1                | 0.1-2        | 0.1-5           |
| Tane Şekli                       | Eş boyutlu yaprak     | Pul          | Altı köşeli pul |
| Özgül yüzeyi (m <sup>2</sup> /g) | 50-800                | 65-100       | 10-20           |
| Tane Kalınlığı                   | 10A                   | 30A          | 0.05-2          |
| Likit Limit                      | 110-710               | 60-120       | 30-70           |
| Plastisite İndisi                | 51-100                | 34-60        | 26-38           |
| Şişme-Büzülme Yeteneği           | Yüksek                | Orta         | Düşük           |
| Özgül Ağırlık                    | 2.35-2.70             | 2.60-3.00    | 2.60-2.95       |

Yapısal formülü  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  olarak verilen kaolinit kilde, bloklar birbiri üzerine binmiş olup, aradaki hidrojen bağları ve aktif Van der Waals kuvvetleri suyun buraya girip şişme oluşturmasını önlemektedir (Şekil 2.3). Bu nedenle kaolinler su ile karışıtlarında stabilizelerini kaybetmezler. Seramik yapımında kullanılmalarının sebebi de budur. Aynı tipten halloysit, kaolinit alt grubunun ilginç bir örneğidir. İki tür vardır, biri kaoline çok benzer, diğeri hidratlı olup  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}.4\text{H}_2\text{O}$  formülündedir. Mikroskop altında içi boş çubuk görünümündedir. Kaolin partikülleri yaklaşık 1µm çapında ve 0,1 µm kalınlığındadır.



Şekil 2.3. Kaolinit kil mineralinin atomik yapısı ve şematik gösterimi (Fell et al.,1992)

Yapısal formülü  $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  olarak verilen montmorillonit kilde, oktahedral tabaka iki silis tabaka arasına sıkışmıştır. Tetrahedronların uçları kristal biriminin ortasına dönüktür. Tabakalar arası bağ, Van der Waals ve katyonlarla sağlandığından çok zayıftır. Su ve polar sıvılar araya girerek bunların ayrılmasına sebep olurlar. Montmorillonitler 20 kata kadar suyu tabaka aralarına alabilmektedir. Na-montmorillonit partikülleri oldukça küçük taneciklerdir ve genellikle tek kristal tabaka şeklindedir ve kalınlığı yaklaşık 1nm'dir. Ca-montmorillonit partikülleri Na-montmorillonite göre daha büyüktür ve 8-10 kristal tabaka şeklindedir ve kalınlığı yaklaşık 20-30 nm'dir. Na-montmorillonit şişme özelliği gösterir ca-montmorillonit ise az şişme özelliği gösterir. Montmorillonitlerin yapısı şekil 2.4'de basitçe gösterilmektedir (Fell et al.,1992).



Şekil 2.4. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi (Fell et al., 1992)

## 2.2. Kil Minerallerinin Mineralojik Yapıları

Kil mineralleri çok küçük yapıda olmalarına rağmen kristal özellik gösterirler. Kristal özelliklerine göre kil minerallerini dört grupta toplamak mümkündür.

1. Kaolonit kil minerali
2. Montmorillonit kil minerali



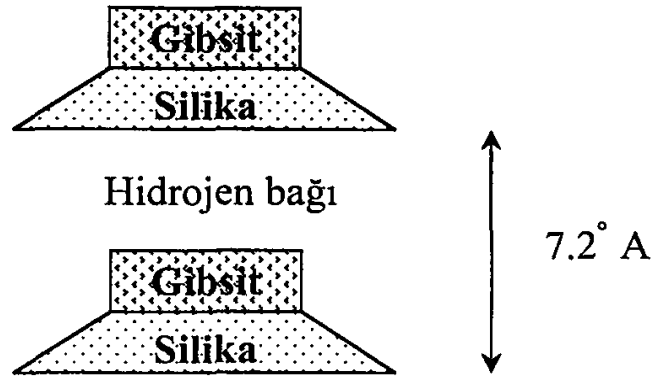
3. İllit kil minerali
4. Klorit kil minerali

Çizelge 2.2. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Konta, 1995).

| Grup İsmi        | Mineraloji               | İdeal Formülü  |
|------------------|--------------------------|--|
| Kaolinit,        | Kaolinit                 | $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$   |
| Serpantinit      | Halloysit                | $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$   |
| Mika             | İllit                    | $K_{-2}Al_3[(Si_{1-6}Al_{-2})O_{20}](OH)_4nH_2O$                 |
| Vermikülit       | Trioktahedral vermikülit | $(Mg,Fe^{2+})[Si_{1-}Al_8O_{20}](OH)_4nH_2O$                     |
| Simektit         | Montmorillonit           | $M^{+}_{x-y}(Al,Fe^{2+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$ |
|                  | Beidellit                | $M_xAl_4[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$                       |
|                  | Notronit                 | $(M^{+}_{x}Fe^{3+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$      |
|                  | Saponit                  | $(M^{+}_{x}Mg_6)[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$               |
| Profilit ve Talk | Profilit                 | $Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$   |
|                  | Talk                     | $Mg_6[Si_8O_{20}](OH)_4$   |
| Klorit           | Donbassit                | $Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$                            |
| Paligorskit,     | Paligorskit              | $Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_44H_2O$                            |
| Sepiyolit        | Sepiyolit                | $Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$                         |

### 2.2.1. Kaolinit grubu

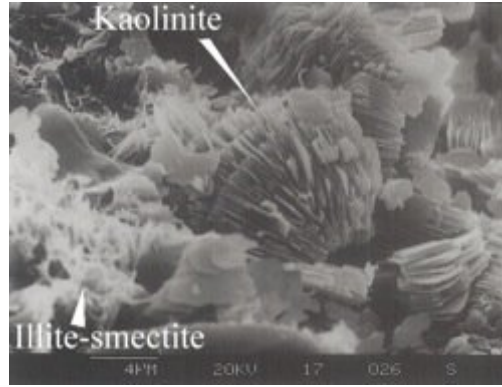
Kaolinit grubu içine pek çok kil minerali girer. Zeminlerin çoğunda bulunur. Bu minerallerin kristalleri levha şeklindedir ve düz kristal üniteleri oluştururlar. Kristal üniteleri bir gibsit ve bir silika tabakasının üst üste gelmesiyle meydana gelmiştir. Her bir tabaka 7.2 °A kalınlığındadır. Her bir tabakanın yanal boyutları 1000-20000 °A ve kalınlığı 100-1000 °A arasındadır. Bu nedenle bunlara 1:1 kristal tipinde olan killere denir. Şekil 2.5’de kaolinit kilinin yapısı şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.5 Kaolinit kilinin yapısı

Kristali oluşturan üniteler birbirine oksijen hidroksit bağı ile sıkıca bağlanmışlardır. Bu yüzden kil ıslandığı zaman kristal üniteleri arasındaki mesafe genişlemez. Kristal üniteleri arasına su moleküllerinin ve katyonlarının girmesi çok güçtür. Bu sebeple kaolinitin efektif yüzeyi sadece dış yüzeylerdir. Bunun sonucu olarak kaolinitin katyon değişim kapasitesi diğer kil mineralleri gruplarından daha düşüktür (3-15 meq/100gr).

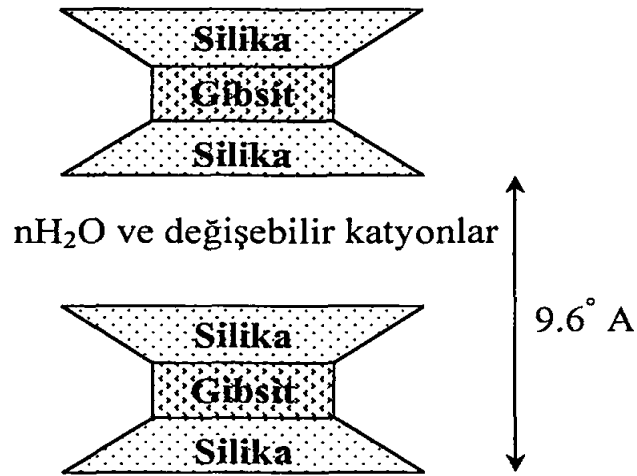
Kaolinit kristalleri montmorillonit kristallerine nazaran daha büyüktür. Diğer silikat kil minerallerinin aksine, kaolinitin plastiklik, kohezyon, büzülme ve şişme özellikleri çok zayıftır. Kaolinitin ıslandığı zaman orta derecede bir plastisiteye sahip olurken, diğer kil minerallerinden daha büyük içsel sürtünmeye sahiptir. Özgül yüzeyleri 10 m<sup>2</sup>/gr civarında, özgül ağırlıkları 2.60-2.68 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır. Kaolinit kilinin formülü 2H<sub>2</sub>O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> dir. Kaolinit kiline ait elektron mikroskop fotoğrafları Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Çetin, 2003).



Şekil 2.6 Kaolinit kilinin elektron mikroskop fotoğrafı

### 2.2.2. Montmorillonit grubu

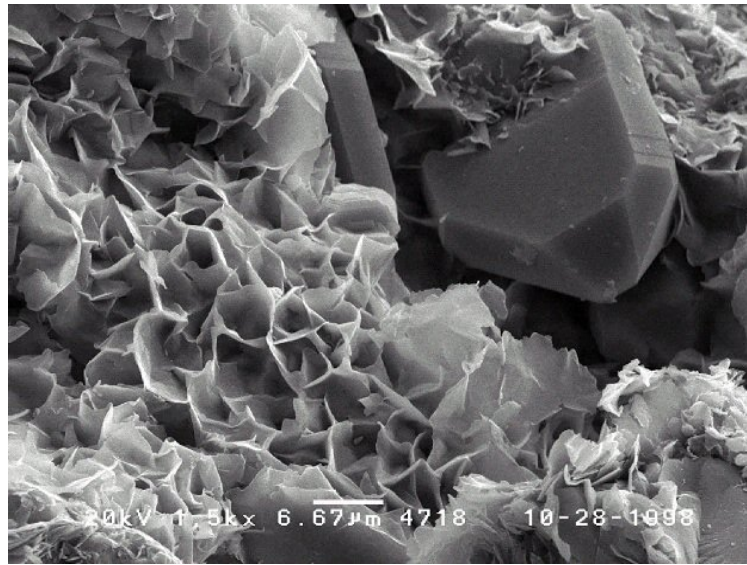
Bu grupta montmorillonitten başka saponit, hektorit, nontronit gibi mineraller de vardır. Montmorillonit kristali alt ve üstten iki silika tabası ile kuşatılmış bir gipsit tabakasından ibaret kristal ünitelerinin üst üste gelmesiyle oluşmuştur. Silis ve gipsit tabakaları oksijen atomuyla birbirine bağlanmıştır. Montmorillonit kristalleri 2:1 tipindedir. Yani iki silika tabakası ve bir gipsit tabakasından oluşan ünitelerden meydana gelmiştir. Montmorillonit kilinin yapısı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Montmorillonit kilin yapısı

Kristal üniteleri birbirine su ve katyonlar ile bağlanmıştır ve kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebilir. Montmorillonit kristallerinin çapları 0.01-2 mikron arasında değişir. Kristal üniteleri arasındaki mesafe kolayca genişleyebildiğinden katyonlar ve su molekülleri üniteler arasına girebilir. Böylece montmorillonit miktarı yüksek olan killer ihtiva ettikleri değişebilir katyonların tabiatına bağlı olarak önemli miktarda şişme veya büzülme gösterebilirler. Montmorillonit kil kristalinin dış yüzeylerine ek olarak geniş iç yüzeyleri mevcuttur. Bu iç yüzeyler de negatif elektrikle yüklüdür. Bu yüzden montmorillonit kili yüksek bir katyon değişim kapasitesine sahiptir. Bu kapasite kaolinitin 10-12 katı, yaklaşık 80-150 meq/100gr'dır. Montmorillonit (Smektit) grubu kil mimerallerinin elektron mikroskop fotoğrafı Şekil 2.8'de gösterilmektedir.

Suyun kristal üniteleri arasına girmesiyle montmorillonit kristalleri büyük oranda genişler ve şişerler. Montmorillonit yaprakları suyla sarılmış olup ıslandıkları zaman yüksek plastisiteye ve düşük içsel sürtünmeye sahiptir. Kurudukları zaman çok miktarda büzülme çatlama meydana gelir. Bu gruptaki killerin özgül yüzeyleri 800 m<sup>2</sup>/gr civarında, özgül ağırlıkları 2.2-2.3 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır. Bu gruptaki killerin genel formülü (OH)<sub>4</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>O şeklindedir.

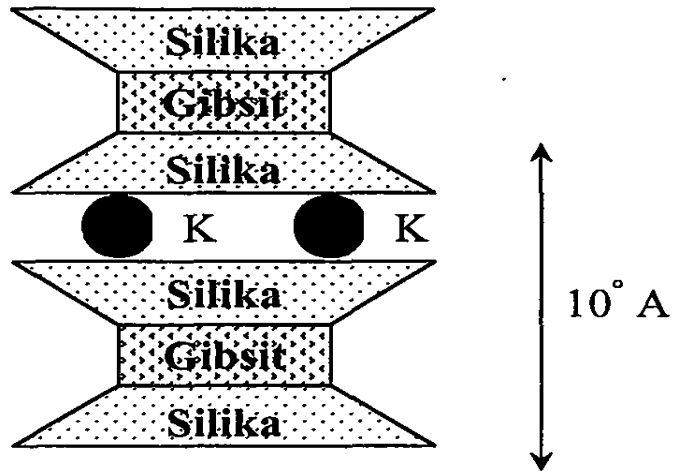


Şekil 2.8 Montmorillonitin elektron mikroskop fotoğrafı

### 2.2.3. İllit grubu

Genel yapısı bakımından montmorillonitlere benzemekle birlikte tane boyutları daha büyüktür. Kristal yapısı 2:1 şeklindedir. Silis tabakasındaki silisin %15'i amorfus yer değiştirmelerle alüminyumla yer değiştirir.  $K^+$  iyonları açıkta kalan yükleri doldurur. Bu iyonların üniteler arasında yer aldığı ve üniteleri bağladığı kabul edilir. Bu sebeple kristal üniteleri arasındaki mesafeler fazla genişleme göstermezler.

İllit kilinin şişme özelliği montmorillonitten az, içsel sürtünme açısı fazladır. İllit minerallerinin özgül yüzeyleri  $80 \text{ m}^2/\text{gr}$  civarında, özgül ağırlıkları  $2.64\text{-}3.0 \text{ gr}/\text{cm}^3$  arasındadır. Bu gruptaki kil minerallerinin formülü  $(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}$   $0.5 < x < 0.75$  şeklinde gösterilir. Şekil 2.9'da illit kilinin yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9 İllit kilinin yapısı

### 2.2.4. Klorit grubu

Demirli taşlar içinde yeşil renkte ve zengin phyllit'li mineralleri belirtmek için bu terim kullanılmaktadır. Kloritler kristalin şistler, hidrotermal taşlar ve çok sayıda silikatların alterasyonundan meydana gelmektedir. Aktüel sedmanlar, toprak ve

sadimenter kayalar içerisinde bulunurlar. Bazı sedimanların başlıca kompozisyonlarını kloritler oluşturur. Klorit daneleri dört katlı (2:1:1) yapısal tabakaya sahiptir. Kloritlerin kristal yapılarını mika ve brunit tabakaları meydana getirir (Yalçın, 1997).

## **2.3. Killerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri**

### **2.3.1 Spesifik Yüzey Alanı**

Kil danelerinin spesifik yüzey alanı dane davranışına etki eden en önemli özelliklerden biridir. Bunun nedenleri;

- 1- Flokülasyon, dispersiyon ve iyon değişimi spesifik yüzey olayına bağlıdır.
- 2- Spesifik yüzey alanı, kil mineralinin dane çapına ve şekline bağlıdır.

Çift tabaka kalınlığı kil danesinin yüzey alanına direkt olarak bağlıdır. Çift tabaka kalınlığı yüzey alanı arttıkça artmaktadır.

### **2.3.2 Elektriksel İletkenlik**

Kil su sisteminin elektriksel iletkenliği, ortamın elektrik taşıma kapasitesinin bir ölçüsüdür. Kil-su sisteminin elektriksel iletkenliği, karışımdaki iyonların tipi ve sayısı ile ilgilidir. Dane konsantrasyonu artarsa, kil yüzeyindeki iyonlar solüsyona karışır. Elektriksel alan altındaki katyon iyonlarının iletkenliği ve koloidal danelerin hareketi solüsyonun iletkenliğini arttırmaktadır.

Bir danede elektriksel yükün değeri doğrudan o danenin yüzey alanı ile ilgilidir. Bu nedenle o danenin davranışına etki eden elektriksel kuvvetlerin kitle kuvvetlerine göre değeri de danelerin birim kütlesine düşen yüzey alanı ile ilgilidir. Dane birim

kütlesine gelen yüzey alanı danelerin davranışına etki eden elektriksel yükün mertebesini gösterir.

### **2.3.3. pH değeri**

Karışımın yüksek pH değeri kil danelerini dispers yapmakta ve kil daneleri yüzeyindeki negatif yükü arttırmaktadır. Dolayısıyla daneler arasındaki itmeyi arttırmaktadır. pH değeri, ortamda  $H^+$  veya  $OH^-$  iyonlarının bulunma derecesini ifade etmektedir. pH değişimi zemin/su karışımını önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük pH değeri, toprakta flokülasyonu ve gevşek zemini ifade etmektedir, yüksek pH değeri ise dispersiyonu ve sıkı zemini belirtir.

pH değeri kil danelerinin adsorpsiyon karakterlerini etkiler. Asit durumunda adsorpsiyon artar. Kil danelerinin köşeleri pozitif yükü yüklenir, pH değerinin düşük olması kil dane yüzeyinin elektriksel potansiyelini azaltmaktadır.

pH değeri şişen zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda, optimum kireç miktarının belirlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bu yöntemde pH değeri 12,40 sınır değer olarak belirlenmiştir. Zemine artan miktarda kireç ilave edilerek pH değeri ölçülür. 12,40 pH değerini sağlayan miktar, optimum olarak belirlenir.

### **2.3.4. Katyon değişim kapasitesi (KDK)**

Katyon değişim kapasitesi, izomorfus yer değiştirme kapasitesinin bir ölçüsüdür. İzomorfus yer değiştirme olayı kristal yapıda herhangi bir değişiklik olmadan iyonların yerlerine eşit veya farklı değerli başka iyonlara bırakmasıdır. Zeminde alüminyumun çok olduğu bir yerde bir silikon atomunun yerini bir alüminyum atomunun alması örneğinde olduğu gibi böyle bir durumda silikon +4, alüminyum +3 olduğu için bu değişimle her değişim için bir dengelenmemiş elektrik yükü ortaya çıkar. Böylece iyonlar eş boyutlu olmadıkları için kristal yapıda şekil bozulması olur.

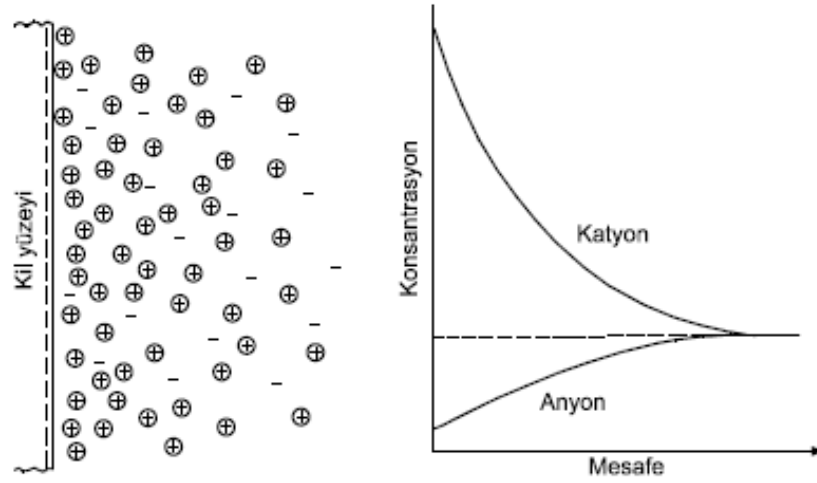
Bunun bir sonucu, kristal yapının büyümesi engellenmektedir. Kaolinit kilinde bu tip değişimler az olup kaolinit kil daneciğinin elektriksel yükü göz önüne alınırsa yaklaşık her 400 silikon iyonundan birisinin bir alüminyum iyonu tarafından tutulduğu söylenebilir.

İzomorfus yer değiştirme kil danelerine negatif yük sağlamaktadır. Bu dengesizliği önlemek için ortamdaki katyonlar kil danelerinin kenarlarına ve bloklar arasına girmektedir. Bu katyonlar birçok durumda yerlerini bir başka katyona da bırakabilmektedir. Yük dengesizliğini giderebilmek için gerekli katyon miktarına katyon değişim kapasitesi denir. Katyon değişim kapasitesi spesifik yüzey alanının artması ile artmaktadır. Katyon değişim hızı kil mineraline, katyonlarına ve anyonlarına bağlıdır (Ergene, 1987).

Killerde katyon değişiminin nedenleri:

- 1) Silika-alümina birimlerinin kenarlarındaki kırık bağlar, katyonlarla dengelenmiş olan doyurulmamış yükler oluşturur. Dane boyutu küçüldükçe kırık bağ sayısı ve buna bağlı olarak da katyon değişim kapasitesi artar. Kaolinit kilinde kırık bağlar katyon değişiminin en önemli nedenidir. Montmorillonit kilinde ise katyon değişiminin %20'si kırık bağlardan, %80'i örgü içi yer değiştirmelerden ileri gelir.
- 2) Örgü içi yer değiştirme ile örgü içinde dengelenmemiş yükler oluşur ve yüklerin çoğu, adsorbe edilmiş katyonlarla dengelenmiştir.
- 3) Açıktaki hidroksillerin hidrojeni değişebilir, katyonlarla yer değiştirebilir. Bu etki de kaolinit kilinde önemlidir.





Şekil 2.10. Kil-elektrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı (Mitchell, 1976)

#### 2.4. Kil Minerallerinin Tanımlanması

Kristal yapıları gözle veya normal laboratuvar mikroskopları ile görülemeyen kil minerallerinin tanımlanması X-ışınları, diferansiyel termik analiz, elektron saçımı, elektron mikroskobu ve kırmızı ötesi ışınları emme yöntemlerinden biriyle yapılabilir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında X-ışınları ve diferansiyel termik analiz yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Brad, 1981; Erdem, 1982; Önalp, 1983; Das, 1983; Craig, 1990; Erguvanlı, 1994).

Zemin ve benzeri malzemeler ısıtıldığında içindeki minerallerin özelliklerine bağlı olarak farklı sıcaklıklarda fiziksel ve kimyasal değişimler olmaktadır. Bu reaksiyonlar su kaybetme, kristal oluşumu, faz değişimi ve oksitlenmedir (Lambe et al., 1979; Erdem, 1982; Erguvanlı, 1994).

Hidratasyon suyu 100-300°C arasında buharlaştırılabilir. Sıcaklık düştüğünde kil yüzeyine yeniden birikir. Kristal kafesindeki OH iyonu halindeki suyun çıkması endotermik bir reaksiyon olup kil minerallerinin tanımlanmasında önemli bir göstergedir. Kristal kafesindeki suyun çıkması mineral yapısını tümüyle değiştirmektedir.

Diferansiyel termik analizde; zeminin oda sıcaklığından 1100°C'nin üzerine yaklaşık 10°C/dak hızla ısıtılması sırasında deney örneğinin gösterdiği tepkime özelliklerinden faydalanarak mineral tanımlanabilmektedir.

Zemindeki ince danelerin minerolojik tanımlaması için en çok kullanılan yöntem X-ışını kırılma deneyidir. Deneyde kristal içinde atomların dizildiği düzlemler arasındaki uzaklıklar ve X-ışınlarının bu düzlemlerden yansıma şiddeti ölçülür. X-ışınları bir maddeye çarptıklarında çeşitli olaylar belirmektedir. Mineral analizi için kullanılan X-ışını difraktometresinde dalga uzunlukları 0.71-1.54-2.29 Å ayarlanmış ışınlar çok ince öğütülmüş örneğin üzerine yollar. Kil kristallerinde atomik düzlem aralıkları 1Å civarında olduğundan ışınlarla uyum sağlandığında düzenli olarak yansıyan ışınlar bir fotoğraf kağıdına yansıyarak yada sayaçta ölçülür. Her kristalin atom yapısı farklı olduğundan emilen ve yansıyan ışın yoğunluğu aynı değildir. Kil minerallerinin tanımlanmasında son derece elverişli olan X-ışınları yönteminde değişik kil minerallerinin tanımlanması için standart kartlar kullanılır (Lambe et al., 1974; Önalp, 1983; Das, 1983; Jumicis, 1984; Rahn, 1986).

Kimyasal maddelerle boyama yöntemiyle kil mineralleri benzidin, safranin ve malachite yeşili gibi kimyasal maddelerle boyanır ve aldıkları renklerle birbirinden ayırt edilmeye çalışılır.

Kil mineralleri elektron mikroskobu yardımıyla 20 000'den fazla büyütülerek belirlenebilir. Minerallerin biçimleri, kristal şekilleri ve büyüklükleri mikroskop yardımıyla tespit edilebilmektedir.

Doğada rastlanılan killer yalnız bir çeşit kil mineralinden ibaret değildir. Birkaç çeşidin ve kolloidal maddelerin karışımından oluşmuştur. İçlerinde kuvars, feldispat, limonit, organik maddeler vs. çok zaman görülür.

## 2.5. Kil Minerallerinin Sınıflandırılması

Kil mineralleri kristal yapılarına ve mineralojik bileşimlerine göre sınıflandırılırlar. Kil minerallerinin kristal yapıları; yaprakçıkların kalınlığını, su alıp şişme yeteneklerini, katyonların izomorf yer değiştirebilme durumunu da etkiler. Kil minerallerinin kimyasal bileşimi oluşturdukları anamateryalin mineralojik bileşimine bağlı olarak değişiklik gösterirler. Kil minerallerinin kimyasal yapısındaki elementler ve bunların oksitlerinin oranları, farklı kil mineralleri arasında belirgin bir ayrımın yapılamayacağını göstermektedir. Kil minerallerinin ağırlıklarına göre kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Kil minerallerinin (ağırlığa göre) kimyasal bileşimi (%) (Scheffer ve Schachtschabel, 1970)

| Kil mineralleri             | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | CaO | MgO   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-----|-------|------------------|-------------------|
| Kaolinit                    | 45-48            | 38-40                          | -                | -                | -   | -     | -                | -                 |
| Montmorillonit<br>Nontronit | 42-55            | 0-28                           | 0-30             | 0-0.5            | 0-3 | 0-2.5 | 0-0.5            | 0.3               |
| İllit                       | 50-56            | 18-31                          | 2-5              | 0-0.8            | 0-2 | 1-4   | 4-7              | 0-1               |
| Vermikulit                  | 33-37            | 7-18                           | 3-12             | 0-0.6            | 0-2 | 20-28 | 0-2              | 0-0.4             |
| Klorit                      | 22-35            | 12-24                          | 0-15             | -                | 0-2 | 12-34 | 0-1              | 0-1               |

Bu nedenle kil minerallerinin sınıflandırılmasında kristal yapısı (tabakaların dizilişi ve düzeni) temel alınarak sınıflandırma yapılmıştır.

İki tabakalı kil minerallerinin esas kalınlığı 7.2 Å olup bunlardan kaolinit su alınca şişmez, halloysit su alınca 10.1 Å’a kadar şişer. Üç tabakalı kil minerallerinin esas kalınlığı 10 Å olup su aldıklarında kil mineralinin cinsine göre 14-18 Å’a kadar şişerler. Dört tabakalı kil minerallerinin ise esas kalınlığı 14 Å olup bunlar su alıp şişmezler. Kil minerallerinin sınıflandırılması çizelge 2.3 te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Irmak, 1970 ile Scheffer-Schachtschabel, 1970'den sadeleştirilerek alınmıştır).

| Tabaka Sayısı ve Yapısı     | Levha Kalınlığı | Kil Minerali Adı | Tabaka Yapısı | Açılma (Şişme) | Yüzeylerde Tutulan Katyonlar | Katyon Değişirme Kapasitesi |
|-----------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------|------------------------------|-----------------------------|
| 2:2<br>1:1<br>Si:Al         | 7.2 Å           | Kaolinit         | Di.           | Yok            | -                            | 3-5                         |
|                             |                 | Halosit          | Di.           | 10.1 Å         | -                            | 5-10                        |
|                             |                 | Serpantin*       | Tri.          | Yok            | -                            |                             |
| 3<br>2:1<br>Si:Al:Si        | 10 Å            | Mika             | Di.           | Yok            |                              |                             |
|                             |                 | Glokonit         |               |                | K ve diğer**                 | 5-40                        |
|                             |                 | İllit            | Di.           | 10-20 Å        | K 0.58<br>Diğer***0.17       | 20-50                       |
|                             |                 | Vermikülit       | Tri.          | 15 Å           | Diğer***0.66                 | 100-200                     |
|                             |                 | Montmorillonit   | Di.           | 15-20 Å        | Diğer***0.33                 | 80-120                      |
|                             |                 | Profillit*       | Yok           | Yok            | -                            |                             |
|                             |                 | Talk*            | Yok           | Yok            | -                            |                             |
| 4<br>2:2<br>Si:Al:Si:<br>Al | 14 Å            | Klorit           | Di.           | Yok            | -                            | 10-40                       |
|                             |                 |                  | Tri.          | Yok            | -                            | 10-40                       |
| Amorf                       |                 | Alofan           |               |                |                              | ≤100                        |

Di. : Dioktahedral, Ti: Trioktahedral, \* nadiren, \*\*glokonit (K, Ca/2, Na)<sub>0.85</sub>, (Al<sub>0.47</sub>, Fe<sup>+3</sup><sub>0.97</sub>, Mg<sub>0.40</sub>), \*\*\*Ca/2, Mg/2, K, Na, H<sub>2</sub>O

## BÖLÜM 3

### PROBLEMLİ KİL ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANDIRILMASI

Problemlili zeminler olarak tanımlanan dispersif ve şişen zeminler bu özellikleri nedeni ile birçok mühendislik yapısında ciddi problemlere neden olmaktadır. Toprak yapılarında meydana gelen içsel erozyonun nedeni olarak dispersif zeminler gösterilirken, hafif yapılarda oluşan problemlerin ana kaynağı olarak da şişen zeminler gösterilmektedir.

#### 3.1. Şişen Zeminlerin Tanımlanması

Şişen zeminler için sınıflama sistemleri, potansiyel şişmeler nedeni ile temel yapıda oluşacak sorunlara bağlı olarak geliştirilmiştir. U.S. Army Waterways Experiment Station tarafından geliştirilen sınıflama Amerika Birleşik Devletlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu sınıflama Onell ve Poormoayed (1980) tarafından özetlenmiştir.

Bu sınıflamadan başka araştırmacılar, zeminlerin bazı özelliklerine bağlı olarak zeminlerin şişme özelliklerine yaklaşım için sınıflamalar önermişlerdir. Holtz (1959), koloid içeriği, plastisite indeksi ve büzülme sınırına; Seed ve diğ. (1962), kil içeriği ve aktiviteye; Altmayer (1955), lineer büzülme, büzülme sınırı ve muhtemel şişme yüzdesine; Dakshanamanty ve Raman (1973), oluşturdukları plastisite kartına; Raman (1967), plastisite indeksi ve büzülme indeksine; Sowers ve Sowers (1970), büzülme sınırı ve plastisite indeksine; Wander Merwe (1964), kil içeriği, plastisite indeksi ve aktiviteye bağlı olarak gerçekleştirdiği şişme potansiyeli abağı; Snethen (1984), likit limit, plastisite indeksi, şişme potansiyeli ve doğal zemin su emmesine; McKeen

(1992), su emme, kuruma anında hacim değişikliği ve yumuşak su ölçümlerine; Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973), Nayak ve Christensen (1974) ve Westen (1980) ise ortaya koydukları ampirik eşitliklere bağlı olarak sınıflamalar önermişlerdir. Şişen killer genellikle %40 dan büyük likit limite, %15 den büyük plastisite indeksine sahiptirler (Das, 1995).

Şişen killer, inşaat mühendisliği yapıları için büyük hasara sebep olan dünya çapında bir problemdir. Özellikle, birbirini izleyen yağışlı ve kurak periyodlar olarak tanımlanan iklimler ve büyük yüzeysel kil depozitlerine sahip bölgelerde görülen bu killer temel zemini olarak değerlendirildiklerinde, temel tabanında önemli ölçüde kaldırma basınçlarının oluşmasına neden olur. Suyu doygun olmayan bazı kil zeminlerin su ile etkileşimde bulunarak bünyelerine su alması ve buna bağlı olarak gelişen hacim artışının karşılanması ile ortaya çıkacak aşırı basınç, kilin “şişme” özelliği olarak tanımlanmaktadır. Oluşan bu basınçlar; temel sisteminde veya döşeme elemanında mimari ve hatta yapısal hasarlar oluşturabilmektedir. Zati ağırlığı oldukça düşük olan kaldırımlarda, karayollarında ve havaalanı pistlerinde, bu problem sık sık görülmektedir (Türköz, 2006).

Şişme özelliği olan, kısmen doygun zeminler, su ile karşılaştıklarında, hacim değiştirirler ve şişmelerine engel olunduğu takdirde ise basınç uygularlar. Bu basınç ‘şişme basıncı’ olarak adlandırılır. Şişen zeminlerin bu özelliklerini ölçmek amacıyla, uygulanan deneysel yöntemler; ‘şişme potansiyeli’ olarak adlandırılan hacim artışını ya da ‘şişme basıncını’, suya doygun hale gelinceye kadar ölçmeye dayanır.

‘Şişme potansiyeli’ laboratuvarlarda belli şartlarda sıkıştırılmış veya tabii (örselenmemiş) bir zemin numunesinin belirli yük altında, sıfır yanal deformasyon durumunda suya doygun hale gelinceye kadar göstermiş olduğu düşey şişme miktarının, numunenin ilk yüksekliğinin yüzdesi olarak ifadesidir. Bu değer, sıfır yanal deformasyon şartlarında aynı zeminde hacimsel artış yüzdesidir. Şişme basıncı ise, şişme potansiyeline sahip killi bir zeminin, bir şekilde su muhtevasının artması durumunda, meydana gelecek hacim değişikliğine engel olabilecek basınç, şişme basıncıdır. Buna, zeminin başlangıç hacmini koruyabileceği basınç da denebilir.

Mühendislik uygulamalarında, şişen zeminleri tanımlamak için tane çapı dağılımı ve Atterberg limitleri gibi klasik deney yöntemlerinden faydalanılır. Bununla beraber ziraat ve jeolojik amaçlı olarak farklı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu deneyler, zeminin kimyasal ve mineralojik yapısı hakkında ek bilgiler verdiği için ihmal edilmemelidir. Çizelge 3.1’de bu deneyler özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Şişen zeminleri belirlemek için yapılan laboratuvar deneyleri (Nelson, et al., 1992)

| Deney                      | Referans                | İncelenen Özellikler                   | Belirlenen Parametreler   |
|----------------------------|-------------------------|--|---|
| Atterberg limitleri        | ASTM standartları 1991  | Plastisite, Kıvam                      |   |
| Likit limit (LL)           | ASTM D-4308             | Plastisitenin üst limiti(w)            | $PI=LL-PL$ =plastisite endeksi  |
| Plastik limit(PL)          | ASTM D-4318             | Plastisitenin alt limiti(w)            | $LL=(w-LL)/(LL-PL)$ =likitlik indisi  |
| Rötre Limiti(SL)           | ASTM D-427              | Zemin rötresinin alt limiti(w)         | R=Büzülme oranı<br>$L_s$ =Lineer rötre  |
| Kil yüzdesi                | ASTM D-422              | İnce tanelerin dağılımı                | 2 $\mu m$ 'den küçük tanelerin yüzdesi  |
| Minerolojik Deneyler       | Whitting (1964)         | Kil partiküllerinin minerolojisi       |   |
| X ışını difraksiyonu       | ASTM STP 479            | Kristal boyutlarının karakteristikleri | Atom aralıkları   |
| Diferansiyel termal analiz | Barshad (1965)          | Isınma karakteristikleri               | Termogramlar üzerindeki alan ve genliklerin pik reaksiyonlarının gösterilmesi |
| Elektron Mikroskobu        | McCrone Ve Delly (1973) | Kil partiküllerinin boyut ve şekli     | Partiküllerin görsel olarak değerlendirilmesi                                 |

Çizelge 3.1. (Devamı)

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| Katyon değişim kapasitesi                | Chapman (1965)                                 | Kil partiküllerinin yük ve partiküllerin yüzey aktiviteleri                                       | KDK(meq/100gr)  |
| Serbest şişme deneyi                     | Holtz ve Gibbs(1959)                           | Havada kurutulmuş konsolide olmamış numunenin ıslanmaya karşı şişmesi                             | Serbest şişme= $(V_{yaş}-V_{kuru})/V_{kuru}$<br>x 100%        |
| Potansiyel hacim değişimi                | Lambe (1960)                                   | Arazi gerilmelerinin uygulandığı sıkıştırılmış numunenin tek eksenli şişme özellikleri            | SI (şişme endeksi) (lb/ft)<br>PVC (potansiyel hacim değişimi) |
| Şişme endeksi deneyi                     | Uniform Yapı Kodu                              | %50 doygunluk derecesindeki numunenin 144 psf sürsaj yükü altında tek eksenli şişmesi             | Şişme indeksi (EI)  |
| Kaliforniya Taşıma Gücü Deneyi           | Yolder ve Witczac (1975)<br>Kassiff vd. (1969) | Sıkıştırılmış numunenin Sürsaj basıncı altında kısmen ıslatılması durumundaki tek boyutlu şişmesi | CBR (%) Şişme Yüzdesi   |
| Lineer Genişleme Katsayısı (COLE) deneyi | Brasher et al. (1966)                          | Doğal zemin parçasının 5 psi'den etüv kurusu konumdaki emme basıncı değerinin lineer değişimi     | COLE VE LE(%)   |

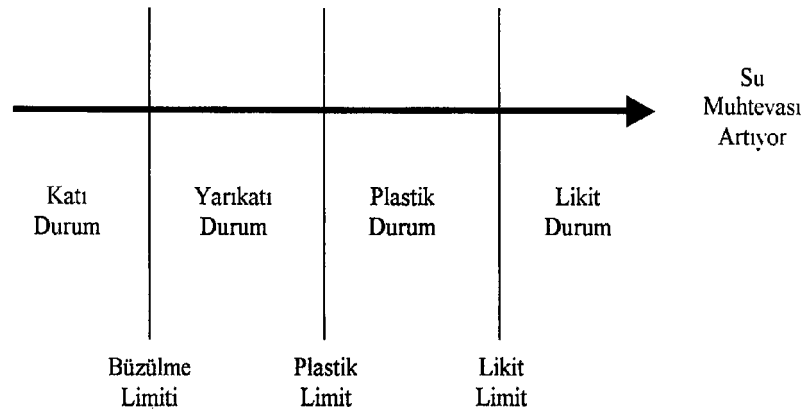
### 3.1.1. Tanımlama deneyleri

#### 3.1.1.1. Zemin sınıflandırma deneyleri

Atterberg limitleri, kolloid oranı, kil yüzdesi, birim hacim ağırlıkları, başlangıç su içeriği vb. gibi zeminin indeks özellikleri şişen zeminlerin tanımlanmasında ve



sınıflandırılmasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Atterberg limitleri ince taneli zeminlerin kıvam limitlerindeki su içeriğini belirler. İnce taneli bir zemin dört farklı kıvama sahip olabilir. Şekil 3.1’de bu kıvam ölçüleri ve bunları belirlemede kullanılan su içeriği değerleri görülmektedir. Bu kıvam değerleri zeminin likit, plastik ve büzülme limitleri ile belirlenir.



Şekil 3.1. Atterberg limitleri ve zemin kıvamı arasındaki ilişki

Atterberg limitleri ve zeminin doğal su içeriği belirlenerek iki kullanışlı değere ulaşılabilir. Bunlar plastiklik indisi (PI) ve likitlik indisi (LI)'dir. Özellikle plastiklik indisi (PI) şişen zeminlerin sınıflandırılmasında sıkça kullanılır ve ön araştırmalar sırasında mutlaka belirlenmelidir.

### **3.1.1.2. Mineralojik yöntemler**

Kil mineralojisi şişen zemin davranışını kontrol eden en temel faktörlerden biridir. Kil mineralleri çeşitli yöntemlerle belirlenebilir (Bkz. Çizelge 3.1).

Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı X-ray difraksiyon (XRD) yöntemidir. X ışını analizinde; x ışını dalga boyunun kil mineralinin atom düzlem ağırlığı ile uyumu, bu yöntemin kil minerallerini belirlemede en uygun yöntem olmasının temel nedenidir.

Diğer sık kullanılan mineralojik yöntemler; diferansiyel termal analiz (DTA) ve elektron mikroskobu yöntemleridir. DTA analizi bir kil numunesinin eş zamanlı olarak ısıtılması ve hareketsiz bir nesneden yararlanılarak yapılmaktadır. Sonuçta uygulanan ısıya karşı değişen sıcaklığı gösteren tomografiler elde edilerek, saf minerallerin tomografileri ile karşılaştırılır. Her mineral tomografiler üzerinde farklı endotermik ve egzotermik reaksiyonlar göstermektedir.

Elektron mikroskopları kil minerallerini direkt gözleme olanağını vermiştir. Elektron mikroskobu kullanılarak kil mineralinin şekli ve boyutu hakkında yalnızca nitel tanımlamalar yapılabilmektedir. Kullanılan diğer bazı mineralojik yöntemler ise; kimyasal analiz, infrared spektroskopi, radyo frekansları ve elektriksel dağılım gibi yöntemlerdir (Çetin, 2003).

### **3.1.1.3. Katyon değişim kapasitesi**

Kil tanesi üzerindeki negatif yüklerin dengelenebilmesi için gereken değişebilir katyonların miktarı, katyon değişim kapasitesi (KDK) olarak bilinir ve meq/100gr ile ifade edilir. Katyon değişimi, zeminlerin temel elektro-kimyasal özelliklerinden biridir ve özellikle killerin davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Deney için; öncelikle zemindeki tuzlar uzaklaştırılarak, zemin bilinen türdeki katyonlarla doyurulur. Değişim meydana gelen bölgeyi doygun hale getirmek için gereken bilinen türdeki katyonların miktarı analitik olarak belirlenir. Kimyasal analizle orijinal katyon kompleksi belirlenebilir. Diğer yöntemler ise; kilin amonyum (NH<sub>4</sub>) iyonlarıyla doyurulması, setilpiridinyum iyonları, kobalt heksamin, bakır dietilendiamin ve bakır trietilentetramin gibi metal organik karışımlarla belirlenmesi hızlı ve kesin sonuç vermektedir. Bununla birlikte, amonyum asetat yöntemi önemini korumakta ve uzun zaman almasına karşın diğer yöntemlerin doğrulanmasında kullanılmaktadır (Ammann, 2003).

KDK kil mineralojisi ile ilgilidir. Yüksek KDK değerleri yüksek yüzey aktivitesini gösterir. Genelde şişme potansiyeli KDK değerleri ile artar. Farklı kil mineralleri için KDK değerleri Çizelge 3.2’te verilmiştir.

KDK değerinin ölçülmesi genellikle zemin mekaniği laboratuvarlarında bulunmayan detaylı ve hassas deney teknikleri gerektirir. Bununla beraber bu deney birçok toprak laboratuvarında kolaylıkla yapılmakta olup pahalı bir deney değildir.

Çizelge 3.2. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri  
(Grim, 1962)

| <b>Kil minerali</b>       | <b>KDK (meq/100gr)</b> |
|---------------------------|------------------------|
| Montmorillonit            | 80-150                 |
| Vermikülit                | 100-150                |
| Halosyt 4H <sub>2</sub> O | 10-40                  |
| İllit                     | 10-40                  |
| Klorit                    | 10-40                  |
| Sepiyolit-Atapulgit       | 20-30                  |
| Halosyt 2H <sub>2</sub> O | 5-10                   |
| Kaolinit                  | 3-15                   |

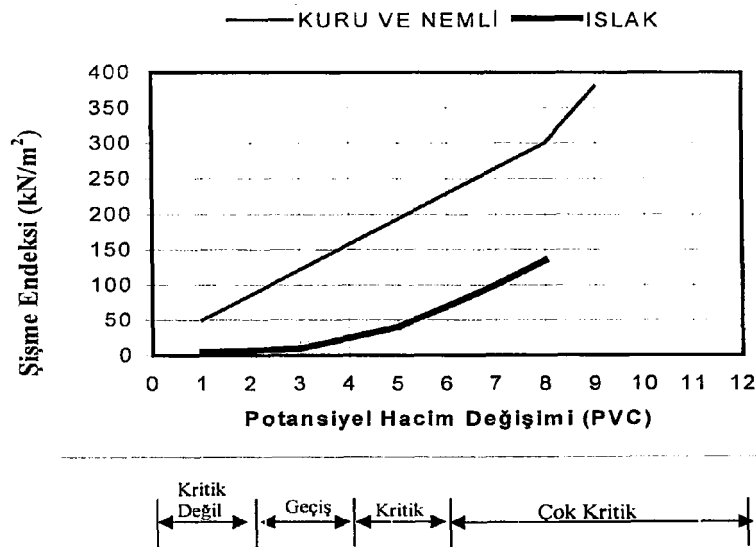
#### **3.1.1.4. Serbest Şişme**

Serbest şişme deneyi 40 nolu elekten geçen bilinen bir hacimdeki kuru zeminin, dereceli bir silindere konularak; zeminin tam doygun haldeki hareketini tamamladıktan sonra şişmiş haldeki hacminin belirlenmesinden ibarettir. Zeminin serbest şişmesi; hacimdeki ilk değişimin ilk hacme olan oranıdır. Yüksek kaliteli ticari bentonitin (sodyum montmorillonit) serbest şişmesi, %1200-2000’dir. Holtz ve Gibs (1956), %100 gibi düşük şişme yüzdesine sahip bir zeminin arazide, hafif yükleme altında ıslatıldığında önemli miktarda şişme meydana geldiğini göstermişlerdir. %50’nin altında serbest şişme gösteren zeminlerin önemli şişme değişimi göstermediği kabul

edilmektedir. Ancak, Dawson (1953) %50 civarında serbest şişme gösteren bazı Texas killlerinin, şişme nedeni ile önemli zararlara yol açtığını göstermiştir. Bunun nedeninin, zeminin şişme karakteristikleri ile aşırı iklim koşullarının birleşmesi olduğu düşünülmektedir (Nelson et al., 1992).

### **3.1.1.5. Potansiyel hacim değişimi**

PVC metre sıkıştırılmış bir zeminin şişme basıncını belirlemek amacıyla standart hale getirilmiş bir alettir. PVC metre arazide veya laboratuarda kullanılabilir. Bu deneyde örselenmiş numune doğal su muhtevasında Proktor sıkışma enerjisi ile (55000 ft-lb/ft<sup>3</sup> (2600 kJ/m<sup>3</sup>)) sıkıştırılarak konsolidometre hüçersine yerleştirilir. Numune konsolidasyon aletinde bir yük halkasına karşı ıslatılarak şişmesine izin verilir. Şişme endeksi yük halkasına bağlı olarak kaydedilir. Değerlendirme için Şekil 3.2’de verilmiş olan abak kullanılır. Bu deneyin avantajları basitliği ve standart sonuçlar vermesidir. Ancak, örselenmiş numunelerin kullanılması nedeni ile arazideki zemin hakkında tasarımda kullanılacak kesin parametreler elde edilemez, bu sebeple tanımlama amacıyla kullanılması daha faydalıdır.



Şekil 3.2. Potansiyel hacim değişikliğine bağlı değerlendirme

### **3.1.1.6. Şişme indeksi deneyi**

Şişme indeksi deneyi; 1960'ların sonunda Amerika'nın Güney Kaliforniya bölgesinde, bölgede çalışan firmaların kullanılan deneylerin standartlaştırılması konusundaki istekleri doğrultusunda geliştirilmiştir. Yöntem istatistiksel olarak Kaliforniyadaki beş farklı laboratuarda denenmiş ve UBS standardı No:29-2 olarak standartlaştırılmıştır. Deney PVC deneyine çok benzemektedir, aralarındaki tek fark bu deneyde şişmenin sabit bir sürsaj yükü altında serbest bırakılmasıdır.

Deney için; zeminin 4 numaralı elekten elenerek ASTM-D-1557-66T standardına göre optimum su muhtevasına getirilir. Daha sonra zemin 6-30 saat kür edilerek standart 4-in (10.2 cm) kalıpta sıkıştırılır. Daha sonra numunenin su muhtevası %50 lik bir doygunluk derecesine göre ayarlanır. Numune üzerine 144 psf (6.9kPa)'lık sürsaj uygulanarak ıslatılır. 24 saat boyunca hacim değişimi izlenir. Şişme indeksi aşağıdaki şekilde hesaplanarak en yakın tam sayıya yuvarlanır.

$$EI=100 \Delta h \times F \text{ (EI=Şişme indeksi)}$$

Burada;

$\Delta h$ =şişme yüzdesi

F=4 numaralı elekten geçen yüzde

Şişme indeksine bağlı olarak şişme potansiyeli aşağıdaki şekilde belirlenir.

Çizelge 3.3. Şişme indeksi değerlerine göre zeminlerin şişme potansiyelleri

| <b>EI</b> | <b>Şişme Potansiyeli</b> |
|-----------|--------------------------|
| 0-20      | Çok Düşük                |
| 21-50     | Düşük                    |
| 51-90     | Orta                     |
| 91-130    | Yüksek                   |
| >130      | Çok Yüksek               |

### **3.1.1.7. Kaliforniya taşıma oranı**

CBR deneyi, karayolu ve havaalanı kaplamalarının projelendirilmesinde yoğun olarak kullanılan bir penetrasyon direnci deneyidir. Zemin, 6 inç (152 cm) çapındaki CBR deney silindirine farklı su içeriklerinde ve yoğunluklarda sıkıştırıldıktan sonra bir sürşarj yükü altında 4 gün suda bırakılır. Sürşarj yükü zeminin arazide maruz kalacağı statik gerilmeye uygun olarak seçilir. Şişme okumaları 4 günlük ıslatma periyodundan önce ve sonra bir ölçüm saatiyle alınır.

### **3.1.1.8. Doğrusal genişleyebilirlik katsayısı (COLE)**

Doğrusal genişleyebilirlik katsayısı (COLE) deneyi, şişen zeminlerin karakterize edilmesi için kullanılan bir büzülme deneyidir. Deney örselenmemiş örneğin (33 kPa) emme durumu ile fırında kurutulmuş emme (1000 kPa) durumu arasındaki doğrusal deformasyonun belirlenmesinden oluşur. Örselenmemiş zemin örneği, su için geçirimsiz ancak su buharı için geçirimli olan esnek plastik reçine ile kaplanır. Daha sonra bu doğal zemin toprakları, basınçlı bir kap içinde 33 kPa zemin emmesine getirilir. Zeminlerin hacimleri arşimet prensibi yardımıyla belirlenir. Daha sonra örnekler fırında kurutulur ve benzer şekilde diğer hacim ölçümleri yapılır. COLE, nemli durumdan kuru duruma geçirildiğinde, örnek boyutundaki değişimin ölçümüdür ve 33 kPa emme ile fırında kurutulmuş toprağın hacim ağırlıklarından belirlenir.

COLE yüzde olarak da hesaplanabilmekte ve bu durumda doğrusal genişleyebilirlik yüzdesi (LEP) olarak isimlendirilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Departmanı Doğal Kaynakları Koruma Servisi tarafından verilen şişme-büzülme potansiyeli sınıflandırması Çizelge 3.4'te görülmektedir (Anonim, 2005).

Çizelge 3.4. Şişme-büzülme potansiyelinin doğrusal genişleyebilirlik katsayısı ve doğrusal genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması (Anonim, 2005).

| COLE        | LEP      | Şişme-Büzülme Potansiyeli |
|-------------|----------|---------------------------|
| <0.03       | <3       | Düşük                     |
| 0.03-0.06   | 3-6      | Orta                      |
| 0.06-0.09   | 6-9      | Yüksek                    |
| $\geq 0.09$ | $\geq 9$ | Çok Yüksek                |

### 3.1.2. Şişen zeminlerin sınıflandırılması

Şişen zeminlerin tanımlama deneyi ile elde edilen parametreleri bazı sınıflandırma şemaları ile birleştirilmişlerdir. Maalesef henüz standart bir sınıflama yöntemi geliştirilmemiştir. Bu yüzden farklı bölgelerde farklı sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadır.

Şişen zeminlerin sınıflandırılmasını güçleştiren en önemli neden; şişme potansiyelinin standart bir tanımının olmamasıdır. Şişme deneylerinin yapıldığı numunenin özellikleri (örselenmiş, örselenmemiş), sürsaj yükü ve deneye etki eden diğer faktörler değişiklikler göstermektedir. Örneğin; Holtz (1959), şişme potansiyelini; havada kurutulmuş örselenmemiş numunenin; 1 psi (6.9kPa) basınç altında, doygun hale getirilmesi sonucu meydana gelen hacim değişikliği olarak tarif etmiştir. Seed vd. (1926) ise; şişme potansiyelini; örselenmiş, optimum su muhtevası ve maksimum yoğunluktaki (AASHTO standardı) numunenin 1 psi (6.9kPa) basınç altında yaptığı hacim değişimi olarak tarif etmiştir. Snethen (1979) şişme potansiyelini; “ şişme potansiyeli doğal su muhtevası ve yoğunluğundaki örselenmemiş numunenin arazideki gerilme şartları altında, ödometre deneyinde denge konumuna geldiği düşey hacim değişimidir” şeklinde tanımlanmıştır. Düşey hacim değişimi bu durumda orijinal yüksekliğe oranı olarak ifade edilmelidir (Nelson et al., 1992).

Arazide gerçekleşecek şişme miktarı çevresel faktörlere bağlıdır. Bu faktörler zeminin doğal konumunda bırakılmasını veya sıkıştırılmasını da içerir. Bu durumda şu

gerçeğin unutulmaması çok önemlidir; aynı şişme potansiyeline sahip iki farklı zemin arazide farklı miktarlarda şişebilir.

### **3.1.2.1. Zemin sınıflandırma yöntemlerine göre sınıflandırma**

Zeminler genellikle indeks özelliklerine göre, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi(USCS) ve Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemine(AASHTO) göre sınıflandırılır. USCS sistemine göre CL ve CH, AASHTO sistemine göre A6 veya A7 olarak sınıflandırılan zeminlerin şişme potansiyeline sahip oldukları düşünülür.

### **3.1.2.2. Mühendislik indeks özelliklerine göre sınıflandırma**

Şişme potansiyelinin belirlenmesi için Atterberg limitlerinin kullanılması en yaygın yöntemdir. Bununla beraber pek çok yöntem kil içeriğini sınıflandırmaya dahil etmektedir. Holtz ve Gibs (1956) örselenmemiş zemin numuneleri için Çizelge 3.5’de verilen kriterleri sunmuşlardır. Altmeyer (1959), pek çok laboratuarda hidrometre deneyinin yapılamadığını düşünerek kil içeriğini elimine ederek, rötrenin veya lineer rötrenin kullanılmasını önermiştir (Çizelge 3.6). Chen (1965); potansiyel şişmenin belirlenmesi için; 200 No’lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve standart penetrasyon sayısı değerleri arasında bir korelasyon geliştirmiştir (Çizelge 3.7). Chen (1988) ayrıca plastisite endeksine bağlı olarak şişen zemin sınıflandırılması için basit bir yöntem sunmuştur (Çizelge 3.8). Seed et al., (1962); sıkıştırılmış killerin şişme karakteristikleri üzerinde bir çalışma yapmış ve aktivite ve kil yüzdesi değerlerine bağlı bir abak oluşturmuştur (Şekil 3.3) (Nelson et al., 1992; Yalçın, 1997; Türköz, 2001).



Çizelge 3.5. Kolloid içeriği, plastisite indisi, büzülme limiti değerlerine göre şişen zeminlerin sınıflandırılması

| İndeks deneylerinde elde edilen değerler <sup>a</sup> |                   |                | Muhtemel şişme (% Toplam hacim değişimi) | Şişme derecesi |
|---|-------------------|----------------|--|----------------|
| Koloid içeriği (%<0.001 mm)                           | Plastisite indisi | Büzülme limiti |  |                |
| >28   | >35               | <11            | >30                                      | Çok yüksek     |
| 20-31   | 25-41             | 25-41          | 20-30                                    | Yüksek         |
| 13-23   | 15-28             | 15-28          | 10-20                                    | Orta           |
| <15   | <18               | >15            | <10                                      | Düşük          |

<sup>a</sup> 1 psi düşey yükleme altında

Çizelge 3.6. Rötire limiti veya lineer rötreye bağlı şişen zemin sınıflandırması

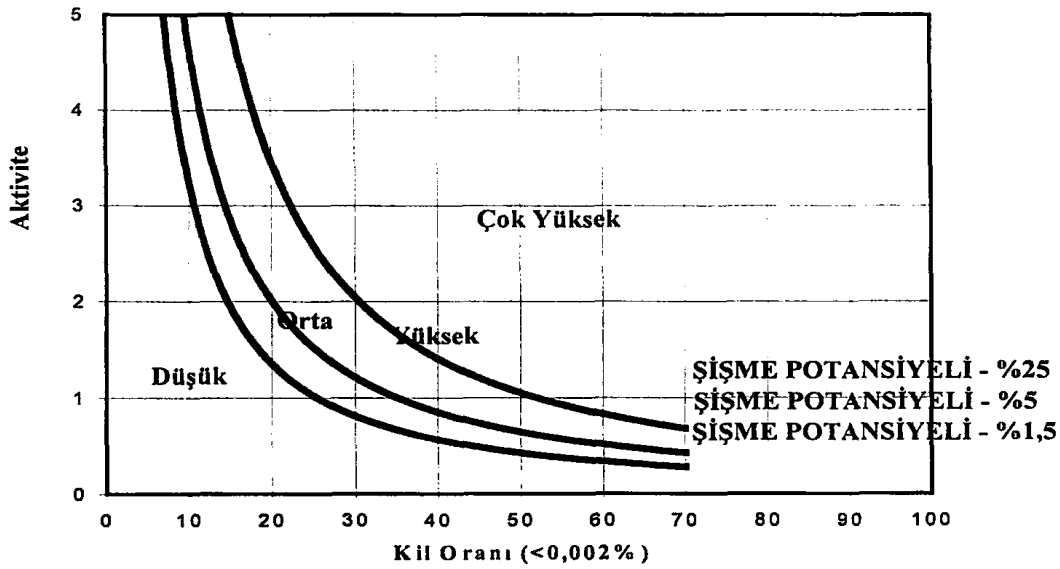
| Lineer rötire | Rötire limiti (%) | Muhtemel şişme (%) | Şişme derecesi |
|---------------|-------------------|--------------------|----------------|
| <5            | >12               | <0.5               | Kritik değil   |
| 5-8           | 10-12             | 0.5-1.5            | Marjinal       |
| >8            | <10               | >1.5               | Kritik         |

Çizelge 3.7. 200 No'lu elekten geçen zemin yüzdesi, likit limit ve penetrasyon direncine bağlı şişen zemin sınıflandırması

| Laboratuar ve arazi dataları |                 |  | Muhtemel şişme (% Toplam hacim değişimi) | Şişme derecesi |
|------------------------------|-----------------|--|--|----------------|
| No.200' den geçen yüzde      | Likit Limit (%) | Standart penetrasyon sayısı (vuruş/ft) |  |                |
| >95                          | >60             | >30                                    | >10                                      | Çok yüksek     |
| 60-95                        | 40-60           | 20-30                                  | 3-10                                     | Yüksek         |
| 30-60                        | 30-40           | 10-20                                  | 1-5                                      | Orta           |
| <30                          | <30             | <10                                    | <1                                       | Düşük          |

Çizelge 3.8. Plastisite indisine bağlı şişen zemin sınıflandırması

| Şişme potansiyeli | Plastisite indisi |
|-------------------|-------------------|
| Düşük             | 0-15              |
| Orta              | 10-35             |
| Yüksek            | 20-55             |
| Çok yüksek        | >55               |



Şekil 3.3. Kil oranı-Aktivite değerlerine bağlı sınıflandırma

Yapılan çalışmalar benzer plastisite özellikleri gösteren zeminlerin birbirinden çok farklı şişme potansiyellerine sahip olabileceğini göstermiştir. Bunun nedeni numunenin özellikleri, içinde buldukları ortam ve farklı su içeriğinde deneye tabi tutulmaları vb. olarak açıklanabilir. Bununla beraber yapılan çalışmaların çoğu likit limit ve plastisite indisinin şişme özelliğini belirlemede kullanılacak en iyi parametreler olduğunu göstermiştir. Şişen zeminlerin sınıflandırılmasında yukarıda anlatılan yöntemlerden başka katyon değiştirme kapasitesi ve COLE değerlerine bağlı olarak geliştirilen yöntemler de vardır.

### 3.1.3. Şişen zeminlere etki eden faktörler

Bir zeminin arazide şişme gösterip göstermeyeceği pek çok faktöre bağlıdır. Şişme özelliği olmayan bir zemin arazideki şartlar ne olursa olsun şişmeye uğramaz. Diğer taraftan şişen zeminler, zeminin başlangıçtaki fiziksel durumuna, daha sonra uğrayacağı gerilme ve su içeriği değişikliklerine bağlı olarak az veya çok şişme ve hatta çökme gösterebilir. Mollamahmutoğlu ve Taşkiran (2000), çalışmalarında, şişme olayına etki eden faktörleri sınıflandırmışlardır (Çizelge 3.9). Çizelgede sıralanan faktörlerden katı madde içeriği, kil minerallerinin türü ve miktarını yansıtır ve potansiyel hacim değişimini belirler. Geriye kalan zemin özellikleri ve çevresel koşullar şişmenin hızı ve miktarını belirlemede etkili olurlar.

Çizelge 3.9. Şişmeyi etkileyen faktörler

| Faktörler                       | Tanımlama  |
|---------------------------------|--|
| <u>Zemin özellikleri</u>        |  |
| Katı madde içeriği:             | Montmorillonit içeren aktif kil mineralleri ve montmorillonit ve diğer kil minerallerinin kombinasyonu ile oluşan karışık tabakalı killer.   |
| Boşluk sıvısı tuz kombinasyonu: | Boşluk sıvısındaki yüksek katyon konsantrasyonu şişme özelliğini azaltma eğilimindedir. Osmoz yoluyla şişme uzun sürede önem kazanır.        |
| Boşluk sıvısı içeriği:          | Tek değerlikli katyonların fazlalığı büzülme-şişme özelliğini artırır. İki ve üç değerlikli katyonlar ise büzülme-şişme özelliğini engeller. |
| Kuru yoğunluk:                  | Yüksek kuru yoğunluk, partiküllerinin daha sıkı dizilmelerine ve şişmenin artmasına yol açar.  |

Çizelge 3.9. (Devamı)

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Yapı:                 | Foleküler yapılar, dağınık yapılara oranla daha fazla şişerler, çimentolanmış partiküller ise daha az şişerler. Ayrılmış dokular şişmenin artmasına yol açarlar. |
| İklim:                | Kurak iklimler kurumayı arttırırken, ılıman iklimler, zeminin nemli kalmasına neden olurlar.   |
| Yeraltı suyu:         | Yüzeysel ve değişken yeraltı suyu zemin nemine kaynak oluşturur ve şişmeye yol açar.   |
| Drenaj:               | Yetersiz yüzey drenajı nem birikimi ve göllenmeye neden olur.  |
| Bitki örtüsü:         | Ağaçlar, çalılar, otlar zemin neminin azalmasına yol açarlar. Bitki örtüsünün alındığı yerlerde ise nem birikimi oluşur.   |
| Yanal basınç:         | Yüksek yanal basınç, şişmenin azalmasına yol açar. Kazı alanları daha fazla şişerler.  |
| Arazi permeabilitesi: | Figürler, permeabiliteyi önemli ölçüde arttırır ve daha çabuk şişmeye neden olurlar.   |

Arazide meydana gelen şişmenin miktarı çok sayıda faktöre bağlıdır. Tabaka kalınlığı, zemine gelebilecek suların kaynakları, başlangıç yoğunluğu ve su muhtevası, sürsaj yükü, yer altı su seviyesi ve aktif bölge derinliği bunlar arasında en önemlileridir. Bunların dışında, zemin yüzeyinde geçirimsiz alanların oluşturulması, kırık su borularından gelen sızıntılar ve insan faktörü gibi etkenlerde şişme olayında etkilidirler.

Killerin şişme davranışında en etkili 3 parametre; başlangıç su muhtevası, başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve sürşarj yüküdür. Zeminlerin su muhtevasında bir artış olmadan zeminin şişmesi beklenmez. Kuru bir zeminin ıslak bir zemine oranla

daha fazla şişme göstereceğibilinen bir gerçektir. Dolayısıyla kilin su muhtevasının yüksek olması nispetinde şişme potansiyeli ve şişme basıncı azalacaktır. Sabit su muhtevasında kuru birim hacim ağırlığının artması ile şişme yüzdesi ve şişme basıncının arttığı bilinmektedir. Çeşitli sürşarj yükleri altında ölçülen şişme değerlerinde sıkıştırılmış numuneler için sürşarj yükü arttırıldığında numunelerin şişme potansiyellerini azaltıcı yönde etki yapmaktadır.

Killerin gerilme tarihçesi de nihai şişme miktarını belirleyen faktörlerden biridir. Daha önce aşırı yüklenmiş ve boşaltılmış numuneler ön yükleme almamışlara oranla daha az şişme gösterirler. Ön yükleme işlemi negatif boşluk basıncının azalmasına ve foleküler yapının disper yapıya dönüşmesine yol açmaktadır. Foleküler yapılar şişmeye karşı daha hassastırlar (Mollamahmutoğlu ve Taşkiran, 2000).

Kuruma-ıslanma tekrarlarına maruz kalan doğal depozitlerin yığılma ve depolanma süreçlerinde Ca, Mg, Al ve Fe bileşikleri etkili olurlar. Bu tür çimentolanma süreçleri zeminin kırılmalık özelliğinin artmasına ve bağlanmış kil gruplarının oluşturduğu kümelerin özgül yüzeylerinin azalmasına neden olur. Neticede örselenmemiş killi zeminler, siltli zeminler gibi davranmakta ve benzer durumdaki sıkıştırılmış zeminlere göre daha az şişmektedir. Bu durum şişme yorulması olarak (fatigue of swelling) adlandırılmaktadır.

### **3.2. Dispersif Zeminler**

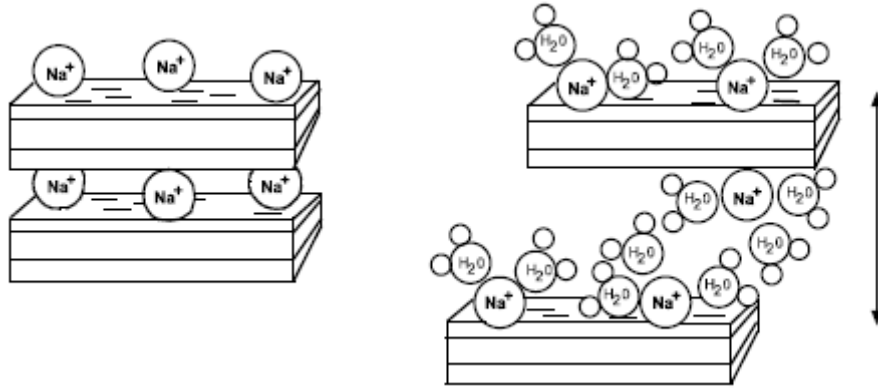
Dispersif killer boşluk suyundaki çözünmüş sodyum iyonu yüzdesi yüksek olduğundan su ile temas ettiğinde, ciddi biçimde erozyona uğrayan minerallerdir. Bu killer, düzgün su içerisinde dahi dağılma ve ayrılmaya uğrayarak süspansiyon oluştururlar. Dispersif kil zeminlerin su yapıları, dolgu barajlar ve yol dolguları yapımında kullanımı söz onusu ise, iyi tanımlanmalı ve uygun teknikler ile yapım gerçekleştirilmelidir. Aksi takdirde, sonu göçmelere kadar giden ciddi mühendislik problemleri ile karşı karşıya kalınmaktadır. Dispersif erozyonun gerçekleşmesi, kilin mineralojisi ve kimyasal yapısına ve bu dolgu malzemesinin boşluk suyu ile malzemeyi

erozyona zorlayan su kütlesindeki çözünmüş tuz muhtevasının niteliğine ve miktarına bağlıdır. Dispersif bir malzeme suya batırıldığında kil mineralleri, normal killerden farklı olarak, diğer zemin daneleri ile aralarındaki elektrokimyasal bağı yitirirler ve su ile süspansiyon yaparlar.

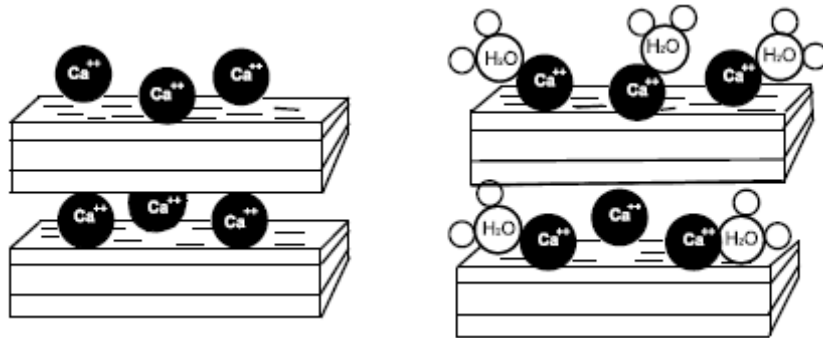
Dispersif kil ifadesinin ilk olarak ortaya atılması, bundan yüz yıl kadar öncelerde olmasına rağmen, 50-60 yıl öncesine kadar zemin araştırmacıları ve ziraat mühendisleri tarafından bu killerin temel yapısı yeterince anlaşılmış değildi. Ancak dispersif kil konusunun inşaat mühendisliği pratiğinde tanımlanması, 1960'lı yılların başlarında olmuştur. Avustralya'da killerin dispersif özelliğinden kaynaklanan toprak barajlardaki borulanma göçmelerinde yapılan araştırmalar sonucunda, konu açık olarak ortaya konulmuştur. Ülkemizde konu, ilk defa DSİ tarafından düzenlenen bir kongrede dile getirilmiştir (Tuncer, 1995). Konu ile ilgili bir TÜBİTAK projesi, Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından yapılmış ve sonuçları rapor edilmiştir (Tosun vd., 2001). Bu çalışmada 10 ayrı baraj projesinden alınmış 27 adet numunenin farklı yöntemler ile dispersif özelliği belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak ilgili deneysel yöntemlerin duyarlılığı araştırılmıştır. Sonraki yıllarda dispersif killer, toprak dolgu barajlar açısından daha detaylı incelenmiş ve konu ile ilgili olarak kilin bu özelliğinin belirlenmesi doğrultusunda nitel ve nicel sonuçlar veren deneysel yöntemler geliştirilmiştir.

Dispersif kilin ayrışmasında boşluk suyunda bulunan sodyum iyonunun ( $\text{Na}^+$ ) önemi büyüktür ve iyonun +1 yükü ile yakından ilişkilidir (Şekil 3.4). Aynı negatif elektrik yüküne sahip bir kil partikülü için gereken nötrleştirici pozitif iyon sayısı, iyonun sodyum olması durumunda, iyonun kalsiyum ( $\text{Ca}^{+2}$ ) veya magnezyum ( $\text{Mg}^{+2}$ ) olması durumuna göre iki mislidir (Şekil 3.5). Ozmotik potansiyel, kil partikülü çift tabakasındaki iyon sayısı ile doğru orantılı olduğu için sodyumlu sistemlerde daha fazladır. Bu şekilde, daha çok iyon içeren çift tabakanın kalınlığı artar ve kil parçacıkları arasındaki çekim kuvveti azalır. Ayrıca tek bağlı sodyum iyonunun kil parçacığı yüzeyine Coulomb cinsinden tutunma kuvveti çok bağlı iyonlardan çok daha azdır. Killerde dispersif potansiyel, genellikle kil içeriğinin montmorillonit gibi ağırlıkça 2/1 mineralojik yapıya sahip olduğu durumlar için geçerlidir. İllitlerin bazıları

da yüksek dispersif özellik gösterirler. Kaolin tipi killer ise çok nadir dispersibilite problemi sergilerler.



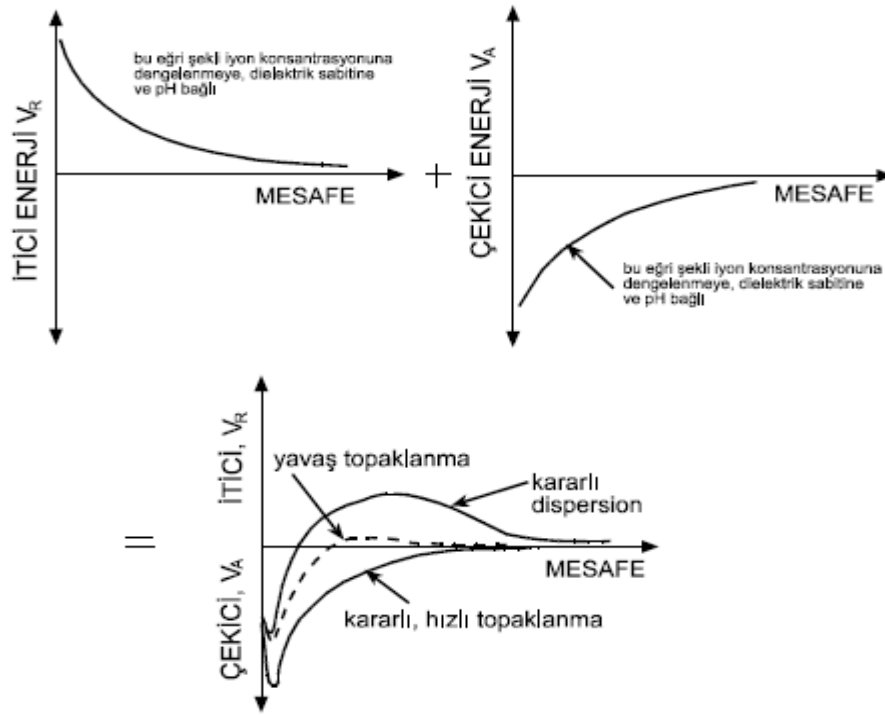
Şekil 3.4. Dispersiyon oluşumuna sodyum etkisinin şematik gösterimi  
(Mc Kenzie, 1998)



Şekil 3.5. Kalsiyum katyonunun topaklanmış yapı oluşumuna etkisi (Mc Kenzie, 1998)

Dispersiyon, zemin tanelerinin su içinde dağılma işlemidir. İki kil partikülü birbirine yaklaştığında potansiyel çekim alanlarının çatışması gerçekleşir. Eğer partiküller oldukça yakınsa, bu itici kuvvetlerin oluşmasına neden olacaktır. Bu itici kuvvetlere Vander Walls çekici kuvvetleri tarafından karşı konulacaktır. Eğer itici kuvvetler çekici kuvvetlerden büyükse zemin dispersif olacaktır (Şekil 3.6). Bu durumda bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılır ve su içinde süspansiyon haline geçer (Tosun, 1994). Eğer su akış halinde ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak

kil kütlesinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olur. Dispersiyon, fiziko-kimyasal bir olaydır ve esas olarak kil mineralojisi ile boşluklardaki ve erozyona neden olan suyun kimyasından etkilenir (Mitchell, 1976).



Şekil 3.6. Kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler (Mitchell, 1976)

### 3.2.1. Dispersif Killerin Tanımlanması ve sınıflandırılması

Dispersivitenin, dispersif karakter taşıyan killerin endeks özelliklerinden herhangi birinin ölçüldüğü standart deneylerle tespit edilmesi mümkün değildir. Bir başka ifade ile, dispersif karakter taşıyan killerin dispersivitesiyle, bu killerin endeks özelliklerinden herhangi birisi arasında sistematik bir ilişki gözlenememiştir (Sherard et al., 1972; Mitchell, 1976; Düzceer, 1984). Bu nedenle dispersif killeri belirleyebilmek için özel deneyler geliştirilmiştir. Arazi gözlemleri, çoğunlukla yamaç molozu ve taşkın ovası çökelleri formunda gelişmiş alüvyonların dispersif killerin jeolojik orijinini oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca denizel ortamda çökelmiş şeyl depozitleri ile kil taşının yerinde ayrışması ile oluşan zeminlerin dispersif risk taşıdığı da



düşünülmektedir. Zayıf ve bodur bitki örtüsüne sahip alanlar, yüksek oranda tuzlu toprakların göstergesidir ve bunların çoğu dispersiftir. Genellemek gerekirse dispersif zeminler kurak-yarı kurak iklimlere özgü olup en çok Meksika, Güney Afrika, Avustralya, Vietnam, Tayland, Gana, Brezilya, Zimbabwe, Kenya ve Güney Amerikada görülürler. Mühendislik malzemesi olarak oldukça önemli bir yer tutan killerde dispersif özelliklerin elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri, konsolidasyon, kompaksiyon gibi klasik laboratuvar indeks deneyleri ile belirlenmesi mümkün değildir. Bu yüzden özel deney prosedürleri geliştirilmiştir. Bu deneyler fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki başlıkta toplanır.

### **3.2.1.1. Fiziksel deneyler**

Çifte hidrometri deneyi; bu deneyde, zemin önce standart hidrometre deneyine tabi tutulur ve numuneye dispersif özellik veren bir madde ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  yada  $\text{Mg}^{++}$ ) ilave edilmek suretiyle mekanik olarak kuvvetli bir şekilde karıştırılır. Aynı zeminde ikinci bir kez başka bir numune, dispersif özellik veren bir madde kullanmadan ve karıştırmaya tabi tutulmadan denir. Her iki numuneye ait boyut dağılım eğrileri çizilerek 0,005 mm den küçük tanelerin ikinci deneydeki yüzdesi birinci deneydekine oranlanarak dispersiyon yüzdesi bulunur ve aşağıdaki bağıntıyla tarif edilir;

$$DY = \Psi / \Phi * 100 \quad (1)$$

Burada; DY: Dispersiyon yüzdesi,  $\Psi$ : Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanmadan 0,005 dane boyutundan küçük danelerin yüzdesi,  $\Phi$ : Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanarak 0,005 mm dane boyutundan küçük tanelerin yüzdesidir. Bu orana göre, dispersiyon yüzdesi %40'dan fazla olan killi zeminler dispersif karakterde kabul edilirler.

İğne deliği deneyi; bu deney Sherard et al. (1976) tarafından geliştirilmiştir. Deneyde, kullanılacak olan zeminden, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış 38 mm uzunluğunda silindirik bir numune hazırlanır. Numune ortasında açılacak 1 mm çaplı

iğne deliğinden belirli bir sabit hidrostatik basınç altında belirli bir süre damıtık su akımı sağlanır. Numuneden çıkan suyun bulanması, iğne deliğinin çapının büyümesi ve ilk 5 dakika içinde artan debi deney zemininin dispersif özellik taşıdığını gösteren işaretlerdir. Numune içerisine açılan bu delikle dolgu barajların geçirimsiz kil çekirdeğinde oluşabilecek bir çatlak ya da kaçak kanalının küçük ölçekte benzeşimi amaçlanmıştır.

Dağılma deneyi; bu deneyde, bir kenarı 15 mm ebadında küp şeklinde bir zemin numunesi 250 ml saf suyun içerisine dikkatlice yerleştirilir. Kaptaki suyun elektriksel iletkenliği ve pH değeri belirli sınırlar içerisinde olmalıdır ( $6,5 < \text{pH} < 8,5$ ). Malzemenin su ile yaptığı reaksiyon ve kolloidal kil parçacıklarının su içerisinde süspansiyon oluşturup oluşturmadığı 5-10 dk süre ile gözlenir. Oluşan bulanıklık derecesine göre zemin; bulanıklık yok denecek kadar az ise "Dispersif Değil", az ise "Ara Zemin", orta derecede ise "Dispersif" ve yüksek bulanıklıkta "Çok Yüksek Dispersif" olarak tanımlanır. Dağılma deneyi sonucunda killerde karşılaşılan durumlar Şekil 3.7'te görülmektedir.



Şekil 3.7. Dağılma deneyi sonucunda karşılaşılan durumlar.

### **3.2.1.2. Kimyasal deneyler**

İçsel erozyon ile zemin kimyası arasında güçlü bir ilişki vardır (Aitchison and Wood, 1965; Sherard et al., 1976). Bu deneylerde zemin numunesi likit limit kıvamına gelinceye kadar saf su ile karıştırılır ve vakum yardımı ile malzemedeki boşluk suyu örneği alınır. Boşluk suyundaki  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$  ve  $K^+$  gibi katyonların miktarı kimyasal yöntemlerle meq/l (mili equivalent/litre) cinsinden belirlenir. İkinci grup deneyler ise kille ilgilidir. Kilin kation değişimi kapasitesi (CEC: Cation Exchange Capacity), her 100 gr kuru zeminde mili equivalent (meq/100gr) cinsinden belirlenir. Ayrıca, değişim kompleksi içerisindeki  $Na^+$  katyonunun rölatif miktarı meq/100 gr cinsinden ifade edilir.

Deney sonuçlarına göre boşluk suyundaki toplam çözünmüş tuzlar (TDS), sodyum yüzdesi, sodyum adsorbsiyonu oranı (SAR) ve değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) eşitlik 2, 3, 4 ve 5'te verildiği gibi hesaplanır;

$$TDS=Ca+Mg+Na+K \quad (2)$$

$$SD=Na/TDS*100 \quad (3)$$

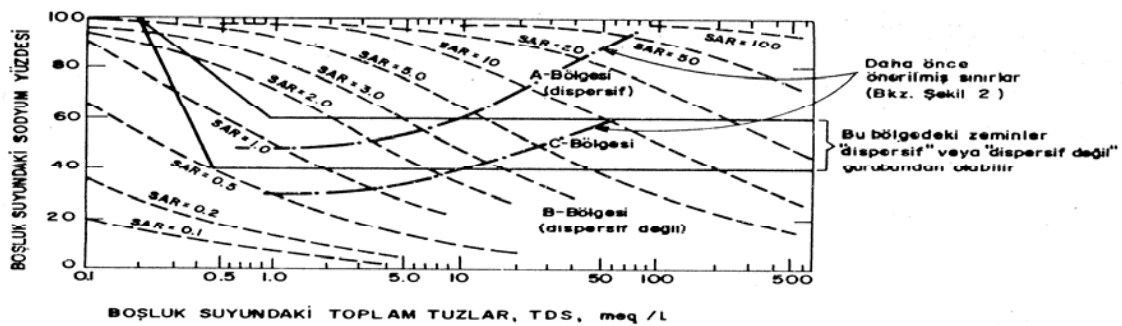
$$SAR=Na/[(Ca+Mg)/2]^{0.5} \quad (4)$$

$$ESP=Na/CEC*100 \quad (5)$$

Burada; TDS: Toplam çözünmüş katyon miktarları (meq/l), SD: Sodyum yüzdesi, SAR: Sodyum adsorbsiyon oranı, ESP: Değişebilir sodyum yüzdesi, Na: Değişebilir sodyum iyonu.

Yapılan çalışmalar SAR ile ESP değerlerinin lineer regresyon analizinde 0,923 gibi yüksek bir korelasyon katsayısı ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Kinney, 1979). Pratikte ise ölçümü daha kolay olan SAR elde edilerek ESP dolaylı yollardan tayin edilmektedir. Ayrıca  $Na^+$  yüzdesinin kil dispersiyonunu ve sonuçta erozyonu etkileyen en önemli parametre olduğu ve TDS değerinin artmasıyla dispersiyon ihtimalinin azaldığı söylenebilir.

Killerin dispersif özelliklerinin tespiti için iki faktör oldukça önemlidir. Bunlar ESP değeri, diğeri ise erozyona neden olan suyun TDS ve SAR değerleridir (Aitchison and Wood, 1965). Bu yaklaşımda, boşluk suyu SAR değerinin 1 veya 2'yi aşması halinde zemin dispersif olarak sınıflandırılır. Avustralya kriterleri olarak bilinen bu kriterleri ve kimyasal deney gözlemlerinden hareketle, dispersibilite sınıflandırması Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Dispersibilite ve boşluk suyundaki çözünmüş tuzlar arasındaki ilişki

### 3.2.1.3 Deneylerin değerlendirilmesi

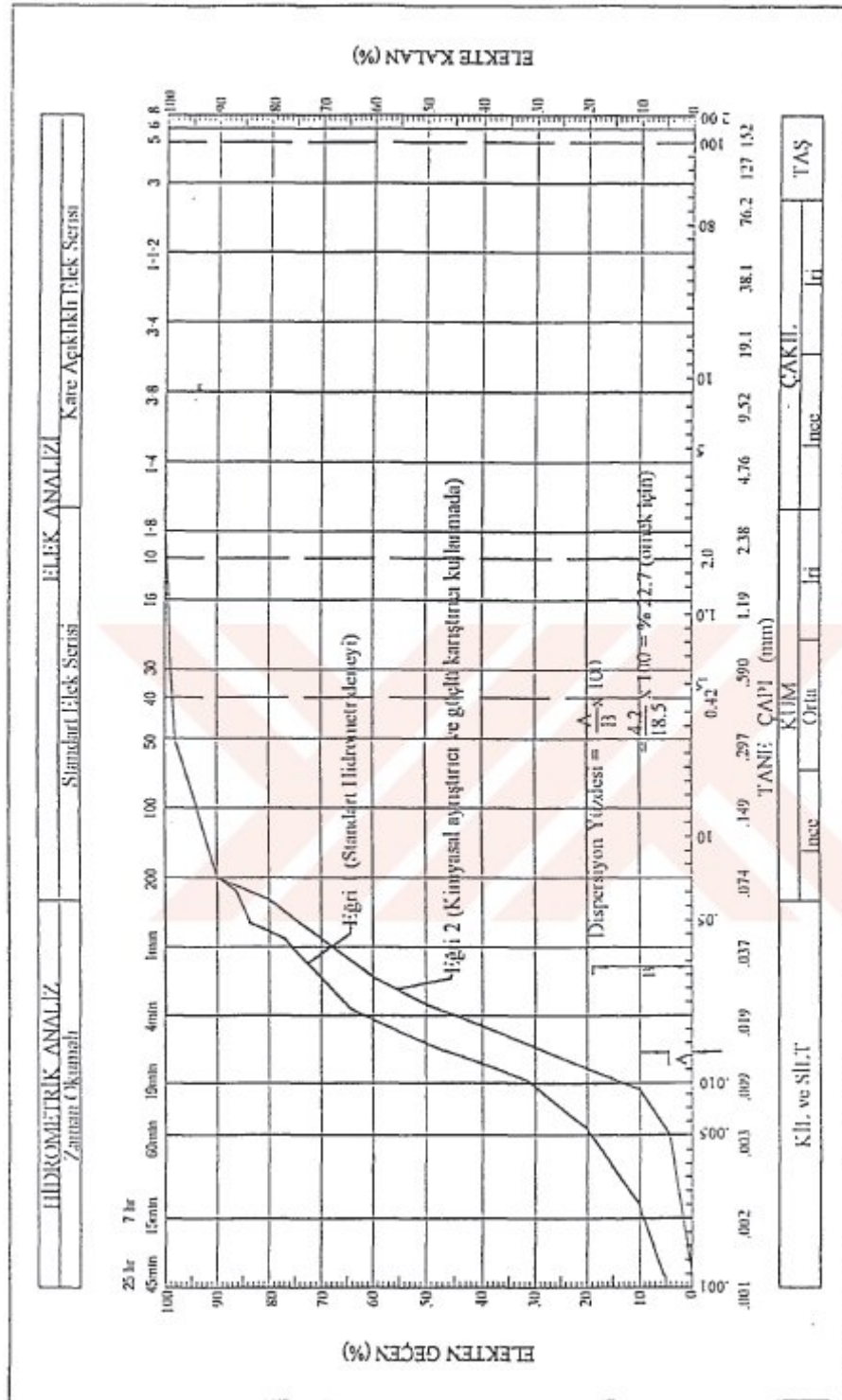
Zemin numunelerinin laboratuara izole edilmiş kaplarda getirilmeleri ve bahsedilen tüm fiziksel ve/veya kimyasal deneylerde kullanılan numunelerin tabii su muhtevasında olmaları gereklidir. Numuneler kesinlikle etüvde kurutulmamalıdır. Bu deneyler iç erozyon potansiyelinin tespiti ve güvenilirlik açısından değerlendirilecek olursa, kimyasal deneylerin öncelik sırasını aldığı görülür.

İğne deliği deneyi basit fiziksel bir deney olmakla beraber içsel erozyon olayını direkt olarak gözleme olanağı sağladığından önemlidir. Çifte hidrometri deneyi çoğunlukla başarılı sonuçlar vermekle birlikte elde edilen sonuçlar tek başına kullanıldığı takdirde yanıltıcı yorumlara neden olmaktadır. Dağılma deneyi, kalitatif bir deney olarak dispersibilite hakkında fikir vermekle birlikte yardımcı bir deney sınıfı olarak kabul edilmektedir. ESP deneyi Avustralya'da, bunun haricindeki deneyler ise ABD'de yaygın olarak kullanılmaktadır.

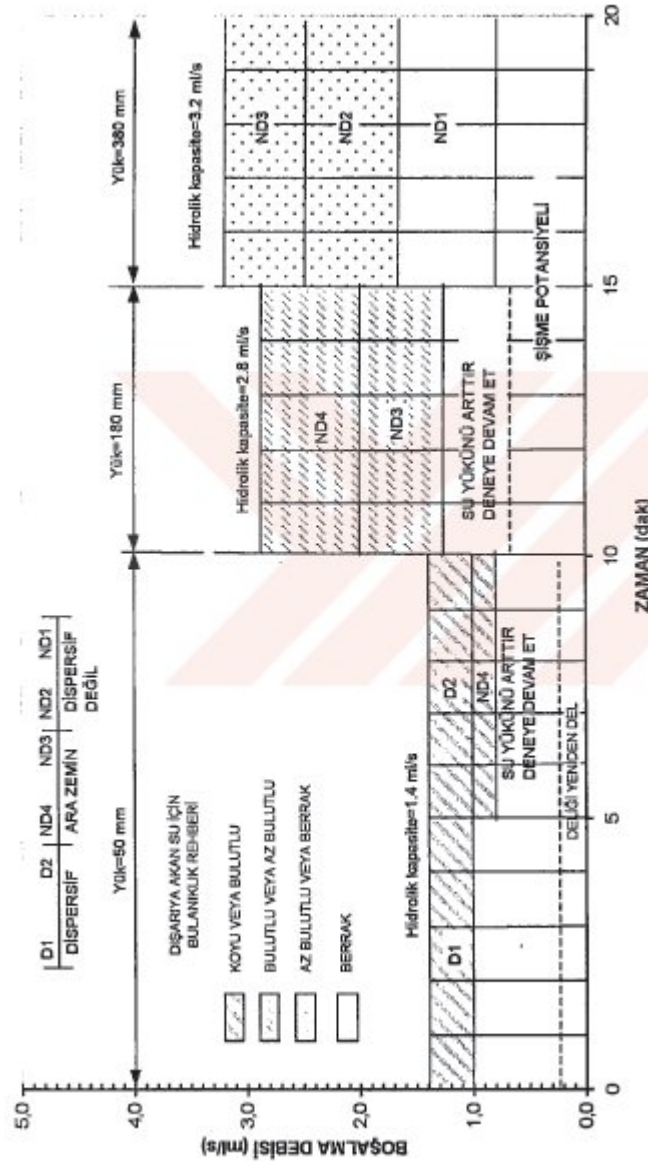
Farklı deneyler arasında, sonuçları açısından zaman zaman bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Dispersiflik durumunu tayin açısından hangi deneylerin daha güvenilir olduğu ve bunların değerlendirilmesi aşamasında hangi yolların izleneceği konusunda, bazı araştırmacılar tarafından halen çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Ülkemizdeki ve diğer ülkelerdeki genel uygulama, numune üzerinde tüm dispersiflik testleri yaptırmak suretiyle bunların birlikte değerlendirilmesidir. Çizelge 3.10'da deneye dayalı yöntemlerin birbirine göre genel bir karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 3.10. Deneylerin genel karşılaştırılması (Aydın ve Aydın, 2006).

| <b>DENEY</b>            | <b>AVANTAJI</b>   | <b>DEZAVANTAJI</b>   |
|-------------------------|---|--|
| Çifte Hidrometri Deneyi | Diğer fiziksel deneylere göre daha kesin sonuçlar verir.                                  | Uzun ve hassas işlem gerektirir.                             |
| Dağılma Deneyi          | Çok hızlı ve pratik şekilde zemin hakkında bir fikir verir.                               | Yardımcı deney olarak görülür tek başına güvenilir değildir. |
| İğne Deliği Deneyi      | Hızlı ve basit olması ayrıca küçük ölçekli bir iç erozyon modelini gözleme imkanı vermesi | Tek başına güvenilirliği tartışılmaktadır.                   |
| Kimyasal Deneyler       | Fiziksel deneylere göre oldukça güvenilir sonuçlar vermesi                                | Uzun ve hassas ölçüm işlemleri gerektirmektedir.             |



Şekil 3.9. Çifte hidrometre deney sonuçlarına bağlı dispersiyon yüzdesi (Savaş, 2008)



Şekil 3.10. İğne deliği deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme yöntemi (Savaş, 2000)

### 3.2.2. Dispersibilitiyi etkileyen faktörler

Killerin dispersibilite karakteristiklerini etkileyen değişik faktörler vardır. Bu faktörlerin etki derecesi değişik zamanlarda farklı şekilde değerlendirilmiştir. Ancak killerin dispersif özellikleri üzerinde kilin kimyası ve mineralojik yapısı, fiziksel özellikleri, aşındırıcı su ve boşluk suyundaki çözülmüş tuzlar ile dolgu barajlarda

kullanılan kilin sıklığı ve dolgu içindeki suyun miktarı, önemli etkiler olarak tanımlanmıştır. Bu etkiler, kısaca aşağıda değerlendirilmektedir.

### **3.2.2.1. Kıvam karakteristikleri ve kil muhtevası**

Daha önce yapılan çalışmalarda zemin plastisitesi ile dispersiyon borulanması arasında bir ilişki tanımlanmıştır. Sherard et al. (1972); verilen bir kil zeminin kıvam limitleri ile dispersif ve dispersif olmayan killerin ayırt edilemeyeceğini ifade etmiştir. Bu durum, çoğu bilim adamı tarafından belirtilmiş olmasına rağmen, konu ile ilgili bazı temel yaklaşımlarda bulunulmuştur. Zeminin plastisite indisi dört'ten küçük ( $PI < 4$ ) olması halinde zeminin dispersif olmayacağı ve dispersif olan numunelerin hiçbirinin "yüksek plastisiteli silt" olmadığı görülmüştür. Daha sonraki yıllarda ülkemiz barajlarında kullanılan kil zeminler üzerinde yapılan çalışmalardan da kıvam limitlerinin dispersibilite yönünden ayırt edici bir özellik taşımadığı görülmüştür (Tosun,1997). Dispersif killerin tanınmasında, yaklaşık bir yöntem olarak tanımlanan Skempton Aktivite Katsayısı'nın da etkili olmadığı belirtilmelidir. DSİ çalışmalarında bu katsayının bir ayırt edici kriter olmadığı ortaya konulmuştur (Tosun,1995; 1997).

Kil içeriğinin dispersif karakteristiklerinin belirlenmesinde etkili olup olmadığının ortaya konulması amacıyla değişik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan kil içeriğinin ayırt edici bir özellik olmadığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalar sonucunda, "% 10'dan daha az kil ihtiva eden zeminlerin dispersif borulanmanın oluşması için gerekli koloidal yapıya sahip olmadıkları" tespiti yapılmıştır (Sherard et al., 1972; Ryker,1977).

### **3.2.2.2. Kilin minerolojik yapısı**

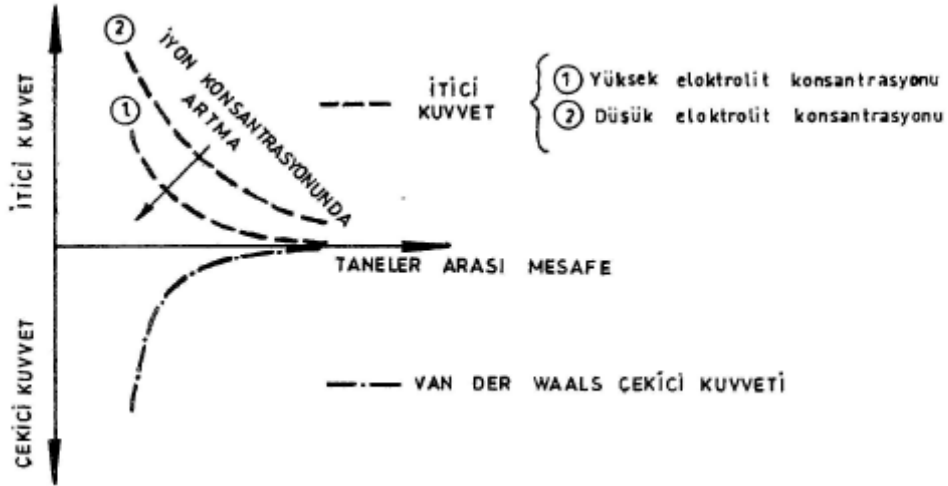
Avustralyalı araştırmacılar; daha iddialı bir şekilde "dispersiyon göçmesine, montmorillonit tipi kilin varlığının önemli ölçüde etkili olduğunu" belirtmişlerdir (Stapledon and Casinader, 1972). Sherard et al. (1976); deneye tabi tutulan ve dispersif



bulunan çoğu numunenin önemli ölçüde montmorillonit ihtiva ettiğini belirtmişlerdir. Ouhadi and Goodarzi (2006), montmorillonit tipi killerdeki dispersiyonun etkisini vurgulamışlardır. Kil minerallerin değişik fraksiyonlarının dispersif karakteristikleri, kimyasal çevre tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedendir ki; kil mineralojisi ve kilin kimyasal kompozisyonu, Avustralya'daki killerin dispersif karakteristiklerinin tanımlanmasında önemle dikkate alınmaktadır. Yüksek ESP (Değişebilir Sodyum Yüzdesi) değerleri, çoğunluğu monmorillonit ve diğer 2:1 tabakalı kil minerallerinden oluşan killerde vardır. Bazı illitler, yüksek dispersif kil özeliği taşımaktadır. Çok miktarda kaolinit içeren kil zeminlerde, dispersif davranış yaygın değildir. Ancak kaolinit içeren granit kökenli zeminlerde dispersif davranış gözlenmiştir (Bell and Walker, 2000).

### **3.2.2.3. Erozyona neden olan sudaki çözünmüş tuzlar**

Erozyona neden olan sudaki çözünmüş tuzların miktarı, zeminlerin dispersibilitesine etkiyen önemli bir değişkendir. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki; erozyona neden olan suyun düşük iyon konsantrasyonu, erozyona karşı düşük bir direncin oluşmasına neden olur. Çünkü itici kuvvetlerin büyüklüğü boşluk suyu içerisindeki iyon konsantrasyonuna bağlıdır. İtici kuvvetler, iyon konsantrasyonunun artmasıyla azalmaktadır (Şekil 3.11). Halbuki Vander Walls çekme kuvvetleri iyonların konsantrasyonundan bağımsızdır (Resendiz, 1977). Erozyona neden olan suyun içindeki iyonların konsantrasyonu, boşluk suyu konsantrasyonuna eşit veya büyük olduğunda erozyon beklenmemektedir. Eğer erozyona neden olan suyun içindeki tuz konsantrasyonu, boşluk suyunun tuz konsantrasyonundan düşük ise, su osmos hareketi ile kil taneleri yüzeyine doğru hareket edebilir ve tabakanın şişmesine neden olur. Bir başka ifade ile, taneler arasındaki bağ zayıflar. Sonuç olarak erozyona neden olan suyun tuz konsantrasyonu düşük ise, borulanma açısından yüksek bir şüphe oluşmaktadır.



Şekil 3.11. Bir kil-su sisteminde fiziko-kimyasal kuvvetler (Resendiz, 1977)

Bir başka önemli nokta, erozyona neden olan suyun içindeki iyonların tipidir. Bu faktör, zemin davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Erozyona neden olan su içindeki iyonların düşük değerliliğe sahip olması, borulanma şüphesini arttırmaktadır. Dispersif killerde oluşan borulanma, genellikle barajın ilk dolumu esnasında gelişmektedir. Ancak bunun aykırı örnekleri de vardır. Örneğin Avustralya'da tuzlu bir alana inşa edilen baraj, yüksek iyonik konsantrasyona sahip bir rezervuar suyu (26 meq/L) ile, sürekli sızma kaçağı olmasına rağmen, uzun yıllar hizmet vermiştir. Ancak sonradan rezervuara 32 km'lik bir boru hattı ile düşük iyonik konsantrasyonlu (1.2 meq/L) su derivasyonu yapılmıştır. Baraj, bu işlemten üç gün sonra göçmüştür (Knodel, 1991).

#### **3.2.2.4. Sıklık ve su muhtevası**

Dolguların, özellikle toprak dolgu barajların geçirimsiz zonunun, yeterli enerjiyle ve uygun su muhtevasıyla sıkıştırılması, dolgu stabilitesi açısından önem arz etmektedir. Dispersif olmayan zeminler açısından bile, bu iki faktör önemle dikkate alınmalıdır. Sıkıştırılmış dispersif killerin erozyonu üzerinde dolgunun kuru yoğunluğu ve başlangıç su muhtevası değişik zamanlarda araştırılmıştır. Bunlardan birinde, en düşük erozyonun optimum su muhtevasının % 2-3 ıslak yönünde olduğu görülmüştür

(Lewis and Schmit, 1977; Wan and Fell, 2004). Aynı araştırmacılar; aynı su muhtevasında oluşan erozyonun, kuru yoğunluğunun artmasıyla azalma eğilimini gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

DSİ uygulamalarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zeminin yoğunluğunun artmasıyla dispersibilite sınıfının değiştiği gözlenmiştir. Ancak burada mekanik erozyon ile dispersif erozyon ayrımı yapılmamıştır. Yoğunluğun ve su muhtevası kontrolünün, tek başına erozyonun oluşmasının önlenmesi yönünden yeterli olmadığı görülmesine rağmen, dikkatli kontrol ve optimum su muhtevası üzerinde sağlanan sıkıştırma işlemi, zemin kütlesinin esnek davranışının gelişmesine neden olmaktadır. Bu şekilde farklı oturma çatlaklarının ve hidrolik çatlamaların oluşması önlenmektedir.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalında, sıklık derecesinin borulanma üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma yürütülmüş ve sonuçları yayınlanmıştır (Tosun vd., 2002). Bu çalışmada, sıklık derecesinin erozyonun hızı üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu alışma sırasında grlmştr ki; dispersif zeminler uygun koşullarda sıkıştırılmış olsalar bile, yine benzer içsel erozyona maruz kalmaktadırlar.

## BÖLÜM 4

### PROBLEMLİ KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

Mühendislik yapılarında neden oldukları hasarlar nedeniyle, şişen ve dispersif zeminlerin farklı içerikli katkıları kullanılarak iyileştirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar uzun yıllardan beri yapılmaktadır (Ouhadi et al., 2006; Murty et al., 2008).

Zemin özelliklerinin mühendislik yönünden uygun olmaması durumunda geoteknik mühendisi aşağıdaki alternatiflerden birine karar vermek durumundadır. Bunlardan birincisi stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini olduğu gibi kabul etmek, ikincisi stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini atıp, yerine amaca yönelik uygun zemin yerleştirmek, üçüncüsü stabilizasyon amacına uygun olmayan zemini ıslah etmektir. Zeminlerin dirençlerini arttırmak veya belirli koşullarda sahip oldukları direnci her türlü hava koşullarında korumak ve aynı zamanda değişken yük ve iklim koşullarının zararlı etkileri altında uzun zaman dayanacakları hale getirilmeleri amacıyla, mekanik veya katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmesi işlemi stabilizasyon olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin üzerinde yapılan işlemler sonucunda, hacimsel stabilite, geçirimsizlik, sıkışabilirlik ve konsolidasyon gibi mühendislik özelliklerinde pozitif değerler elde edilmektedir. Zeminlerin stabilizasyonu, zeminin kayma direncini, dayanımını arttıran, geçirimsizlik ve hacimsel değişim yeteneğini azaltan işlem olarak tanımlanmaktadır (Angın vd., 2005).

#### 4.1. Dispersif Zeminlerin Stabilizasyonu

Tosun ve Savaş (2001), dolgu barajlarda oluşan göçmenin önemli bir nedeni olarak içsel erozyon gösterilmektedir. İçsel erozyon, zemin cinsine göre farklı şekilde oluşmaktadır. Bu tip göçmenin oluşmasında da, zeminlerin dispersif özelliğinin önemli

bir etkisi vardır. Bu killerin doğru tanımlanması, sonradan oluşacak problemlerin çözümündeki zorluk ve yüksek maliyetten dolayı önemli bir aşama olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada Afyon, Eskişehir ve Bilecik illerinde inşa edilmekte olan veya işletme aşamasında bulunan on barajın kil ocağından alınmış düşük plastisiteli yirmi yedi adet zemin örneği üzerinde, önce tanımlama deneyleri yapılmış, daha sonra çifte hidrometri, dağılma ve iğne deliği gibi dispersibilite deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Savaş (2008), dispersif killerin tanımlanmasında etkili olarak kullanılan iğne deliği deneyinin yeniden tasarımını gerçekleştirmiştir. Deney sistemi, standart zemin örneklerinin iki, üç ve beş katı büyüklükte örneklerin kullanılabilceği gibi geliştirilmiş ve her boyut için tasarım kartları oluşturulmuştur. Teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, boyut etkisi dikkate alınarak mukayeseli olarak değerlendirilmiş ve değerlendirmede bulanık mantık ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılmıştır. Tanımlanmış örnekler üzerinde farklı boyutta deneyler yapılarak, geliştirilen sistemin hassasiyeti ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, dispersif killerin tanımlanmasında daha gerçekçi verileri tahmin etmek için büyük boyutlu örneklerin etkili olarak kullanılabilceği görülmüştür.

Aydın ve Aydın (2006), çalışmalarında, baraj mühendisliğinde önemli ekonomik bir malzeme olarak kullanılan killerde, dispersibilite ve bundan kaynaklanan içsel erozyon olayı ele alınarak, dispersibilitenin nedenleri ve tespit yöntemlerini tartışmışlardır. Ayrıca bu olayın oluşmasını önlemek amacıyla uygulamada dolgu baraj gövdesi içerisine yapılacak filtre, dispersif özellikteki kil çekirdeğin etrafının dispersif olmayan kil ile koruyucu bir zarf içerisine alınması ve bunun haricinde pratikte çok kullanılan kile sönmüş kireç ilavesi, alüminyum sülfat ilavesi ve rezervuar suyuna alçı ilavesi gibi alınabilecek tedbirler tartışmaya sunmuşlardır.

Türköz vd. (2010), magnezyum klorür solüsyonunun kil zeminlerin şişme potansiyeli ve dispersibilite karakteristikleri üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Bu amaçla, Afyon ilinden elde edilen üç değişik zemin numunesi üzerinde tanımlama ve kompaksiyon deneyleri öncelikli olarak yapılmıştır. Numunelerin şişme potansiyelinin

belirlenmesinde şişme yüzdesi deneyleri, dispersibilite özelliklerinin değerlendirilmesinde de iğne deliği deneyi, dağılma deneyi, çifte hidometri deneyi ve kimyasal deneyler yapılmıştır. Dispersif özelliğe ve şişme potansiyeline sahip bu numunelerin magnezyum klorür solüsyonu kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Katkının etkisini değerlendirmek için standart Proctor enerjisinde ve farklı magnezyum klorür katkı oranlarında (% 0, 1, 3, 5, 7, 10) hazırlanan numuneler üzerinde şişme ve dispersibilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, problemlili kil zeminlerin iyileştirilmesinde magnezyum klorür solüsyonun kullanılabileceği ve özellikle %7 katkı oranından sonra etkin bir iyileştirme sağlandığı görülmüştür.

Dispersif killerin erozyonunu önleyen diğer bir kimyasal katkı malzemesi ise alüminyum sülfattır ( $Al_2(SO_4)_3$ ). Zeminin kuru ağırlığına göre %0,5-2,0 oranında alüminyum sülfat ilavesi, dispersif karakteri bertaraf etmektedir (Landau and Altschaeffl, 1977). Alüminyum sülfatın zemine tatbiki, kolay eriyebilir olması nedeniyle, kireçten daha ucuz ve daha az tehlikelidir. Bu tür katkıların kile ilavesi; baraj gövdesi üzerinde olabileceği gibi, kilin temin edildiği ocaktada gerçekleştirilebilir. Ancak bu tür uygulamaların bir dezavantajı, işleme tabi tutulacak malzeme hacminin çok büyük olması durumunda ekonomik olmamasıdır. Bu durumda zeminle etkileşime geçen rezervuar suyuna kimyasal madde katılması daha ekonomik olmaktadır. Kimyasal işlemin, su veya zeminden hangisine yapılması gerektiğine karar vermek için mutlaka ekonomik mukayese yapılmalıdır. Bu yöntemeye dayalı uygulamalarda başarılı sonuçlar alınmadığını rapor eden araştırmacılar olduğu gibi (Ingles, 1972), Avustralya'da rezervuar suyunun alçı ( $CaSO_4$ ) ile muamelesi sonucu başarılı olmuş uygulamalara ait raporlarda mevcuttur (Grant et al., 1977).

#### **4.2. Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu**

Hacim değiştirme özellikleri taşıyan kil minerallerine sahip şişen killere ülkemizin bir çok bölgesinde rastlanmaktadır. Şişen killerin hacim değiştirme kapasitesine sahip olması düşey hacim değişimine neden olmakta ve yapısal hasarlara neden olmaktadır. Karayolu, istinat duvarları ve elastik zemin üzerinde inşa edilen plak

temeller gibi birçok inşaat mühendisliği uygulamalarında zeminin hacim değiştirme özelliğine sahip olması durumunda yapısal problemler ve dizayn problemleri ile karşılaşılabilir. Hafif yüklenmiş yapılarda temel zemininin şişme özelliği gösteren kil minerallerine sahip şişen kil içermesi durumunda yapının aktardığı düşük düşey basınç nedeniyle yapı farklı oturmalara maruz kalmakta ve büyük hasarlar meydana gelebilmektedir. İklim ve çevre koşullarının değişmesi şişen killerin zemin emme basınçlarında önemli miktarda değişiklik oluşturmaktadır (Angın vd., 2005). Şişen zeminlerin iyileştirilme yöntemleri aşağıdaki başlıklar altında tolanabilir:

- Kimyasal katkı maddeleri
- Ön ıslatma
- Sıkıştırma kontrolü ile zeminin yerleştirilmesi
- Sürsaj yüklemesi
- Isı ile iyileştirme
- Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirilmesi
- Su muhtevasının korunması

#### **4.2.1. Kimyasal katkı maddeleri**

Çimento üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda Zeolitin %30 dan fazla katılmasının çimentonun 7 günlük basınç dayanımını düşürdüğü belirtilmiştir. Ancak %20 oranında katıldığı zaman 7 günlük basınç dayanımı TS-26'da belirtilen değer üzerine çıkmaktadır (Bellikli, 1988).

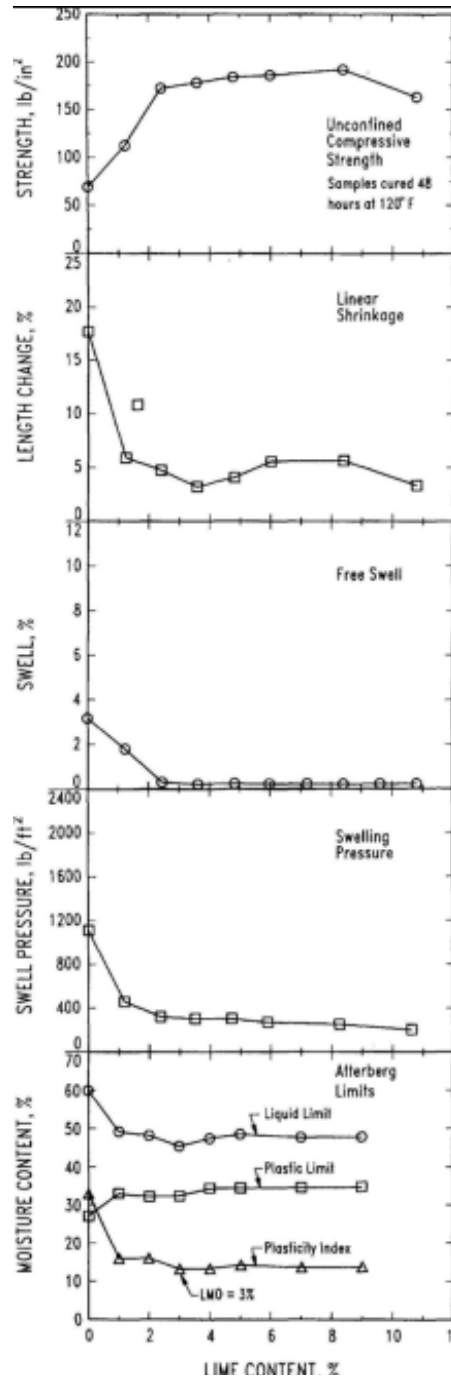
İpek (1998), şişen zeminlerin kireç, çimento ve uçucu kül kullanılarak stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışmada şişen bir zemin %0-8 arasında çimento ve kireç ile stabilize edilmiştir. Ayrıca %0-25 arasında uçucu kül kullanılarak stabilize edilmiş, 7 ve 28 günlük kürlerin etkileride incelenmiştir. Deneyler sonucunda; katkı maddesindeki artışın, silt miktarını arttırdığı, kil miktarını düşürdüğü, likit limit ve plastisite indisinin azaldığı, %8 çimento, %8 kireç ve %25 uçucu kül katkısının zemin

sınıfını değiştirdiği, ilave malzeme miktarının artması ile zemin aktivitesinin azaldığı, kr süresinin şişme için gereken zamanı şişme potansiyelinde neden olduğu azalmaya oranla daha fazla azalttığı, %3-5 mertebesinde katkı maddesinin şişme potansiyelinin azaltılmasında daha önemli etkiye sahip olduğu bulunmuştur. şekil 4.1'de killi bir zeminde kireç stabilizasyonu sonucu meydana gelen geoteknik değişimlere bir örnek çalışma verilmiştir.

Waddah S. Abdullah and Ahmed S. Alsharqi (2011), şişen büzülen zeminler gibi problemlili zeminler ortadoğuda ve dünyanın birçok yerinde yaygındır. Bu tip zeminler ıslanarak ve kuruyarak, üzerine inşa edilmiş yapılara ciddi zararlar vermektedir. Bu çalışmada şişen ve büzülen zeminlerin imento kullanılarak iyileştirilmesine çalışılmıştır. Bu çalışmada orta derecede genleşen zeminler ( $12 < PI < 24$ ) seçilmiştir. Zemin numuneleri çeşitli imento yüzdeleriyle karıştırılmıştır (1%, 2%, 3% and 4%) ve kalıba n-ıslanma kuru yoğunluk ve nem oranı öngörülerek dklmştir. %2 oranında imento içeren numune 28 gün kr edilmiştir orta derecede genleşen zemin için yeterli düşüş sağlanmış ve şişme yüzdesi %7.4'ten %0.4'e kadar dşmştir. Potansiyel şişme basıncı, her nasılsa, zarar verici yüksek değerden(333kPa) aynı şartlarda iyileştirilmemiş zemin için tolere edilebilir değere (20 kPa) dşmştir. şişme potansiyeline karşı zaman ilişkisi doğal ve iyileştirilmiş zemin için dikdörtgen hiperbolik fonksiyon olarak tam bir şekilde temsil edilir.

Harichane et al. (2011), çalışmalarında doğal puzolanla kirecin kombine edilerek zemin iyileştirmedeki uygulaması incelenmişlerdir. Bu çalışmada laboratuvar testleriyle kohezyonlu zeminlerin fiziksel ve mekanik karakteristiklerinin üzerindeki etkisi doğal puzolan, kireç veya ikisi kombine edilerek incelenmiştir. İki kohezyonlu zemine doğal puzolan, kireç ve doğal puzolan –kireç karışımı sırasıyla %0-20 ile %0-8 olarak ilave edilmiştir. İyileştirilmiş zeminler 1, 7, 28 ve 90 gün kr edilmiştir. Sonuçlar gsterdiki kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda doğal puzolan ve kireç başarılı olmuştur.





Şekil 4.1. Killi bir zeminde kireç stabilizasyonu sonucu meydana gelen geoteknik değişimler (Rollings ve Rollings, 1996)

#### **4.2.2. Ön ıslatma**

Bu yöntem; su içeriği yüksek olan zeminlerin daha düşük şişme göstereceği ilkesine dayanır. Eğer zemin yeterince yüksek su içeriğine sahip ise önemli bir hacim değişimi olmayacağı kabul edilebilir. Plastik limit değerinin üzerine kadar ıslatılan zeminlerde şişme potansiyeli önemli ölçüde azalmaktadır. Ancak bu yöntemin kullanımını sınırlandıran önemli sakıncalar mevcuttur. Şişen zeminler genellikle çok düşük permeabilite değerlerine sahiptirler bu nedenle zemini yeterince ıslatmak çok uzun zaman alabilir. Ayrıca zeminin su içeriği arttırıldığında zemin dayanımının ve şev stabilitesinin önemli ölçüde azalabileceği unutulmamalıdır. Su içeriği arttırılan kısımdaki su zamanla alt tabakadaki zemine etkiyecektir. Bunun da yapı üzerinde beklenmeyen hasarlara neden olabileceği unutulmamalıdır.

#### **4.2.3. Sıkıştırma kontrolü ile zemin iyileştirme**

##### **4.2.3.1. Kaldırıp yeniden yerleştirme**

Şişme özelliği gösteren bir zemini kaldırarak yerine şişmeyen zemin konulması sağlam temel zemini oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem şişen tabaka düşük bir kalınlığa sahip ise bu tabakanın tamamının kaldırılması, şişen tabakanın çok kalın olması durumunda ise yeterli kalınlığın belirlenip bu noktaya kadar olan kısmın değiştirilmesi ilkesine dayanır. Kaldırılması gereken kısmın kalınlığı, alttaki zeminin şişme potansiyeline bağlı olarak belirlenir. Dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminin, alt tabakaya su iletmemesini sağlamak amacıyla dolgu malzemesi olarak granüler zeminlerin kullanılması önerilmez. Dolgu tabakası yüksek yoğunluklarda sıkıştırılarak, yüksek taşıma gücü elde edilebilir. Bu yöntem özel aletler gerektirmediği ve kısa sürede tamamlanabildiği için ekonomik olabilir. Ancak dolgu malzemesinin yapıya yakın bölgede bulunması gereklidir. Aksi halde malzemenin taşınması fazladan maliyet getirebilir. Bazı durumlarda kaldırılması gereken tabaka pratik olarak uygulanmayacak kadar yüksek olabilir.

#### **4.2.3.2. Örselvip veniden sıkıştırma**

Şişen zeminlerde şişme potansiyeli kuru yoğunluğu azaltarak düşürülebilir. Optimum su içeriğinin üzerinde en az kuru yoğunluk sağlayacak şekilde hazırlanan zeminler daha düşük şişme potansiyeline sahiptirler. Arazide bulunan zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılması, uygulamaların ekonomik olmasını sağlar. Eğer doğru sıkıştırma uygulanırsa, zemin yeterince geçirimsiz olur, bu da alt tabakalara suyun geçmesini engeller. Ancak yoğunluğun düşük olması taşıma gücü problemlerine neden olur.

#### **4.2.4. Sürsaj yüklemesi**

Şişen killerde şişme basıncı değerine yakın değerlerde bir sürsaj yüklemesi yapılarak şişme engellenebilir. Bu yöntem ancak düşük-orta derecede şişme potansiyeline sahip zeminlerde pratik olarak kullanılabilir. Şişme değerleri ile şişme basıncı arasındaki ilişkinin doğrusal olmaması, şişme basıncının artması yöntemin uygulanmasını güçleştirmektedir.

#### **4.2.5. Isı ile iyileştirme**

Zeminler 200 °C'ye kadar ısıtıldıklarında şişme özelliklerini önemli ölçüde kaybetmektedirler. Günümüzde yöntemin pratik olarak uygulanması henüz geliştirilememiştir.

#### **4.2.6. Elektrokimyasal yöntemlerle zemin iyileştirmesi**

Elektroozmoz ve kildeki baz değişimi elektrokimyasal zemin iyileştirmesini oluşturur. Elektroozmoz sonucunda zeminin suyu uzaklaştırılır ve zemin sertleşir.

Elektrokimyasal sertleştirmede amaç kil içerisinde istenilen katyonların yoğunluğunu arttırarak zeminin fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesidir.

#### 4.2.7. Su muhtevasının korunması ile zemin iyileştirme

Zemindeki şişme problemleri su muhtevsındaki değişimlerden kaynaklanmaktadır. Eğer zemin içerisindeki su muhtevsının değişimi uygun bir yöntemle engellenebilirse şişme problemleri büyük ölçüde çözümlenebilir. Su tutucu bariyerlerin zeminlerde su muhtevsının değişimini engellemek için kullanılabilir. Burada amaç yapıya yakın bölgelere geçirimsiz bir tabaka oluşturarak yapının altında kalan zeminde oluşabilecek su muhtevası değişimlerini minimuma indirmektedir. Yapımdan önce olduğu gibi koruma amaçlı olarak da uygulanabilir. Düşey ve yatay su tutma bariyerleri olarak iki farklı şekilde imal edilebilirler.

#### 4.3. Zeolitin Yapısı ve Üretimi

Zeolit doğal ya da yapay olmak üzere atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip sulu alümina silikat bileşiklerine verilen isimdir. İlk olarak İsveç’li mineralog Fredrick Cronstedt tarafından 1756 yılında bulunmuştur. Bu kristaller ısıtıldıklarında yapılarında bulunan suyun köpürmesinden dolayı Yunanca kaynayan taş anlamına gelen Zeolit adını almıştır (Sarıkaya, 2006).

1756 yılında İsveçli kimyacı ve mineralog Fredrick Cronstedt’in bir bakır madeninde yeni bir mineral bulmasıyla tanımlanan doğal zeolitler iki asır boyunca yalnızca volkanik kayaların boşluklarında yer alan mineraller gözüyle bakılmış ve kristal yapısının analizi yapılmamıştır. Zeolitler üzerinde ilk deneysel çalışmalar 1857 yılında A. Dumour tarafından yapılan zeolitlerin su tutma tersinirliği ile 1858 yılında E. Erchorn’un gerçekleştirdiği iyon değişim özelliklerinin incelenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Zeolitler hidrate alüminyum silikat mineralleridir. Mineralin kristal kafesinde su ve çeşitli katyonların ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Sr}^{++}$  ve  $\text{Ba}^{++}$ ) geçebildiği birbirine

bağlı boşluklar bulunmaktadır. Geniş izomorfik yer değiştirme özelliği gösteren zeolit minerali bu özellikleri nedeniyle yüksek bir katyon değişim kapasitesi ve toprak çözeltilisinde katyonların adsorbsiyonunda seçicilik özelliğine sahiptir. Mineralde divalent katyonlardan daha çok monovalent katyonlar ve özellikle  $\text{NH}_4^+$  ‘un alıkonulduğu kaydedilmiştir (Flanigen, 1981).



şekil 4.2. Zeolit

Doğal zeolitler doğada volkanik tüflerin değişimi ile oluşan mineral grubudur. Doğal zeolitinin tabiatta bilinen 50 ye yakın minerali bulunmaktadır. İkincil yapı üniteleri ve iskelet yapılarının kombinasyonu temel alınarak yapılan zeolit minerallerinin sınıflandırılmıştır (Çizelge 4.1).

Dünya zeolit rezervlerini tam olarak tespit edilmiş rakamlarla vermek mümkün değildir. Dünyada zeolit oluşumları 1950’lerden sonra saptanmaya başlamış ve hemen hemen bütün kıtalarda yaygın olarak görölmüştür. Yeryüzünde sedimanter kayalarda en fazla klinoptilolit mevcut olmakla birlikte, en az onun kadar ticari değeri olan

mordenit, filipsit, şabazit, erionit ve analsim minerallerine de oldukça sık rastlanmaktadır.

Çizelge 4.1. Zeolit minerallerinin sınıflandırılması

| GRUP | İKİNCİ YAPI ÜNİTESİ | GRUP MİNERALLERİ   |
|------|---------------------|--|
| 1    | Tek 4lü halka       | Analsim, Harmotom, Flipsit, Gismondin, Paulingit, Lömöntit, Yuguwaralit. |
| 2    | Tek 4lü halka       | Eriyonit, Offretite, Levynit, Omega                                      |
| 3    | Çift 6 lı Halka     | Foyasit, Zeolit-X, Zeolit- Y, Şabazit, Gmelinit                          |
| 4    | Çift 6 lı Halka     | Natrolit, Skolesit, Mezalit, Tomsonit, Gonnardit, Edingtonit.            |
| 5    | Kompleks 4-1        | Mordenit, Dokhiorit, Ferrierit, Epistilbit, Bikitait                     |
| 6    | Kompleks 5-1        | Hölandit, Klinoptilolit  |
| 7    | Kompleks 4-4-1      | Stilbit, Brewsterite   |

Zeolit konusunda rezerv miktarlarından ziyade, tespit edilen oluşumlarından mineralojik-kimyasal-fiziksel detay araştırmalarının yapıp yapılmadığından bahsetmek daha yerinde olacaktır. Çünkü özellikle volkanosedimanter bölgelerde tesbit edilen zeolit oluşumları, en kaba tahminler ile ve tüm sınır değerleri en düşük seviyelerde tutulsa bile milyar ton' lar ifade edilebilen yayılmalara sahiptir. Bu tip jeolojik bölgelere sahip ülkelerin birçoğu yüksek zeolit rezervlerine sahiptir. Bu durumda teknolojik parametreler açısından araştırmalarını tamamlamış ülkeler sanki dünya ülkeleri arasında en büyük rezervlere sahip gibi görünmektedir. Bu değerlendirmeler çerçevesinde önemli zeolit üreticisi olan Küba, Eski SSCB, A.B.D, Japonya, İtalya, Güney Afrika, Macaristan ve Bulgaristan' ın önemli rezervlere de sahip olduğu söylenebilir.

Ülkemiz ise doğal zeolitler açısından ideal jeolojik ortamlara sahip olmasına rağmen, ülkemizde ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında analsim

oluşumları saptanmıştır. Daha sonra Ankara'nın batısında analsim ve klinoptilolit yatakları bulunmuştur. Volkano tortul oluşumlarının gözlenebildiği ülkemizde daha çok klinoptilolit ve analsim türleri yoğunlukta olup diğer türlere çok az rastlanılmıştır. Türkiye' de detaylı etüdü yapılmış tek zeolit sahası Manisa –Gördes civarındaki MTA ruhsatlı sahadır. Sahada 18 milyon ton görünür zeolit rezervi ve 20 milyon ton zeolitik tuf rezervi tespit edilmiştir. Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise, Türkiye'nin en önemli zeolit yatakları tespit edilmiş olup kolaylıkla işletilebilir. Nitelikte yaklaşık 500 milyon ton rezerv 1995 yılında tahmin edilmektedir. Diğer bölgelerde detaylı bir çalışma yapılmamış olup, ülkemiz genelinde toplam rezervin 50 milyar ton civarında bulunduğu tahmin edilmektedir.

Ülkemizde kesin doğal zeolit rezerv tespit çalışması bulunmamaktadır. Bunun başlıca nedeni, henüz bilinen zeolit oluşumlarının birçoğunda volkanik içerisindeki zeolit zonalarının sınırlarının belirlenmemiş olmasıdır. Ancak, Gördes, Bigadiç, Emet, Kırka ve Karamürsel gibi bazı bölgeler için gerekli zeolitli zonlar gerekse kayaç içerisindeki zeolit oranları ile ilgili yapılan ayrıntılı çalışmalar milyarlarca ton zeolit tuf rezervini ortaya koymuştur. Özellikle Gördes ve Bigadiç'de kayaç içerisindeki zeolit oranı ortalama % 80 civarındadır.

Türkiye' deki yatakların büyüklüğü ve kalitesine rağmen işletilebilirliği ve kullanım alanları üzerindeki bilgilerin azlığı, zeolit kaynaklarının değerlendirilmesine engel olmaktadır. Dünyada doğal zeolitlerin kullanımı ve üretimi hızla gelişmekte ise de ülkemizde bu zamana kadar, zeolit üretimi yapılmamıştır. Pilot çapta ürün kullanımı belirleme çalışmaları için küçük yapılmaktadır.

#### **4.3.1. Zeolit katkısı ile çalışmalar**

Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir (Erdem vd., 1997). Doğal zeolitlerin kullanılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliği, ısıtma ve soğutma

sistemlerinin hem ilk yatırımlarında hem de yapıların kullanımları süresince ortaya çıkan enerji harcamalarında önemli tasarruflar sağlayacaktır (Bektaş vd., 2003). Zeolit, çimento yerine belirli oranlarda kullanılırsa basınç dayanımı değerlerini fazla etkilememekle birlikte, betonun birim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısını azaltarak ısı yalıtımına katkı sağlayacaktır (Kılıçarslan, 2007).

Doğal zeolit katkısı içeren betonlar üzerinde yapılan araştırmalar, sahip olduğu yüksek puzolanik aktiviteden dolayı, zeolitın beton özelliklerini iyileştirdiğini ve yüksek performanslı beton üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Feng et al., 1990). Beton içerisinde doğal zeolit kullanımı, erken yaşlarda daha az mukavemet kaybına neden olmakta ve bağlayıcı madde hamurunun porozitesini azaltarak mukavemet gelişimine katkıda bulunmaktadır (Poon et al., 1999). Doğal zeolitlerin yüksek gözenekliliğe ve düşük ağırlığa sahip olması, hafif yapı taşı olarak yapı endüstrisinde kullanımlarını mümkün kılmaktadır (Sarıkaya, 2006). Portland çimentosu klinkeri ile karşılaştırıldığında daha yumuşak bir malzeme olan zeolitın sahip olduğu boşluklu yapı, öğütme işleminin daha kolay olmasını ve kısılmasını sağlamaktadır (Canpolat vd., 2004). Ancak yapılarında doğal olarak bulunan bu gözeneklerden dolayı karışım içerisinde ihtiyaç duyulan su miktarı fazlaştığından, aynı kıvamda çimento hamuru üretebilmek için süper plastikleştirici kimyasal katkı kullanımına gereksinim duyulmaktadır (Fragoulis et al., 1997). Doğal zeolitler, alkali-agrega reaksiyonu ve sülfat atağı sonucunda ortaya çıkacak zararlı hacim genleşmelerini önleyerek beton durabilitesine katkıda bulunmaktadır (Janotka et al., 1998).

Yıldız vd. (2010), pomza ve zeolit gibi yüksek silis içerikli minerallerin yüksek dayanımlı beton (YDB) içerisinde puzolan olarak kullanımının mineralojik, moleküler, elektrokinetik (zeta potansiyel) ve simültane termal açıdan uyumu araştırmışlardır. Bu amaçla bağlayıcılar üzerinde fiziksel, kimyasal, mekanik, mineralojik, moleküler, elektrokinetik ve termal analizler yapılmıştır. Daha sonra yüksek dayanımlı beton tasarımı gerçekleştirilirken çimentoya ikame edilmek suretiyle (0P15Z “%0 Pomza+%15 Zeolit”, 5P10Z, 10P5Z ve 15P0Z) olmak üzere dört tip YDB üretilmiştir. Üretilen YDB’lar üzerinde bir takım taze beton deneyleri ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bağlayıcılar üzerinde yapılan analizlerden alınan veriler ile YDB’lardan



alınan verilerin birbiriyle uyum içerisinde olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuçta pomza, zeolit ve CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal, mineralojik, moleküler, elektrokinetik ve termal uyumunun, üretilen YDB türlerinde de ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Kılınçarslan (2008), Manisa-Gördes bölgesinden temin edilen zeolit öğütülerek çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda kullanılarak betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlarda su, ince agrega ve iri agrega miktarları sabit tutularak çimento yerine ağırlıkça % 0, 5, 10 ve 15 oranlarında zeolit kullanılmıştır. Üretilen betonların yoğunlukları, basınç dayanımları ve termal iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Normal beton ile çimento yerine ağırlıkça % 5, 10 ve 15 zeolit kullanılarak üretilen betonların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Ancak, çimento yerine ağırlıkça % 5, 10 ve 15 zeolit kullanılarak üretilen betonların birim ağırlıkları azalmış ve ısı yalıtım özellikleri olumlu yönde artmıştır.

#### **4.3.2. Zeolit kullanım alanları**

Zeolitlerin endüstriyel alanlarda kullanılabildiği 1940'lı yıllarda ortaya konulmasına rağmen tali mineral olarak volkanik kayaların boşluk ve çatlaklarında bulunduğu bilinmesi kullanımlarını sınırlamıştır. Ancak 1950'li yıllardan sonra denizel ve gölsel tüflerin de zeolit içerdiklerinin saptanmasıyla, doğal zeolitlerin kullanım alanları hızla genişlemiştir.

Zeolitlerin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri olan; iyon değişikliği yapabilme, adsorbsiyon ve buna bağlı moleküler elek yapısı, silis içeriği, ayrıca tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenek yapısı zeolitlerin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmalarına neden olmuştur. Portland çimentosu yapımında, kirlilik kontrolünde, enerji ihtiyacının karşılanmasında, madencilikte, peyzaj planlamasında, hafif yapı malzemesi üretiminde, kağıt endüstrisinde (Mumpton, 1978), hayvan yem rasyonlarında (Erener vd., 1995), gübrelemede (Lewis et al., 1984), endüstriyel atık sularda (Anonymous, 1992), toprakta (Mineyew et al., 1990) ağır metal

içeriğinin azaltılmasında kullanılır ve ayrıca toprak düzenleyici (MacKown, 1978) olarak da kullanılırlar.



Şekil 4.3. Zeolitin tarım alanında kullanılması

#### 4.3.3. Zeolitin inşaat sektöründe kullanım alanları

Zeolitler inşaat sektöründe başlıca şu şekillerde kullanılırlar.

- Puzzolan çimento
- Hafif agrega
- Boyutlandırılmış taş

İlk puzzolan çimentosu yol, su geçidi ve kamu binalarının yapılması için Napoli yakınlarındaki zeolitik tüfler kullanılarak İtalya tarafından üretilmiştir. Zeolitik puzzolan çimentoları sürekli su ile temas içinde olan yapılarda etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Zeolitik tüfler dünyanın birçok yerinde içlerinde zeolit olduğu bilinmeden yalnız silis bileşimlerinden yararlanılmak amacıyla kullanılmaktadır. Yugoslavya, Bulgaristan ve Almanya’ da büyük miktarlarda zeolitik tuf, puzzolan çimentosu üretimi için işletilmektedir.

Zeolitler 200 yıldan beri yapı taşı olarak kullanılmışlardır. Zeolitli tüflerin hafif oluşu kadar dayanıklı oluşları ve kolaylıkla kesilip işlenebilmeleri de yapı taşı olarak

kullanılmalarının en önemli nedenleridir. Güney Meksika’ da birçok binalar % 90 mordenit ve klinoptilolit içeren zeolitik tüflerden kesilmiş taşlardan yapılmışlardır. Aynı şekilde Japonya’ nın Otsunomiyo kenti yakınlarında yüzlerce yıldır yapı taşı olarak işletilen zeolitler 100 metreden fazla kalınlığa sahiptirler. Bu yapı taşı olarak işletilen zeolitler, % 80–85 klinoptilolit yanında az miktarlarda montmorilonit, kaledonit ve volkanik cam içerirler. Orta İtalya’ daki ünlü Napoli kentinin hemen hemen tüm binaları büyük miktarlarda şabazit ve filipsit içeren sarı zeolit tüflerinden yapılmışlardır. Orta Avrupa’ daki birçok büyük binalarda, Almanya’ daki Leacher bölgesindeki zeolitik tüflerden kesilmiş yapı taşları kullanılmıştır. Avrupa’ daki birçok ülkede, zeolitlerin yapı endüstrisinde değişik biçimlerde kullanılma olanakları araştırılmaktadır. Klinoptilolit, perlit gibi, 1200–1400 °C’ ye kadar ısıtıldığında, içerdiği suyun ani olarak buhar fazına geçmesi ile genişmekte ve bu anda soğuma sağlanırsa hafif ve gözenekli bir silikat malzemesi oluşmaktadır. Böylece geliştirilmiş zeolitlerde yoğunluk 0,8 g/cm<sup>3</sup> e kadar düşmekte, gözeneklilik de % 65’ e kadar çıkabilmektedir.

Genleştirilmiş doğal zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımı daha yüksek olup, genleştirilmiş hafif agrega üretilmektedir. Doğal zeolitik tüfler düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdadırlar. Bu özelliklerinden dolayı hafif yapı taşı olarak yapı endüstrisinde kullanımları mümkündür.

Gelişmiş ülkelerde doğal zeolitlerin yapı endüstrisinde kullanımı görülmektedir. Bu ülkelerin başında Rusya, Kanada, A.B.D., Japonya ve Belçika gelmektedir. Özellikle Rus bilim adamları doğal zeolitlerden yapı endüstrisinde, dekoratif süslemelerde kullanılması için çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaların sonuçlarını patent olarak hayata geçirmişlerdir.

Zeolitik tüf yatakları birçok ülkede puzzolonik hammadde olarak kullanılmaktadır. Zeolit puzzolanları, son beton ürününün daima yeraltı su korozyonuna maruz kalacağı hidrolik çimentolarda, önemli uygulamalar bulmaktadır. Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak puzzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle, betonun katılma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir.

Zeolitik tüfler, düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdırlar. Kolayca kesilip işlenebilmeleri ve hafiflikleri ile iyi bir yapı taşı olarak kullanılabilirler. Doğal zeolitlerden elde edilen hafif yapı malzemelerinin kullanılmasıyla, yapı ağırlıklarının azaltılması sonucu, deprem güvenliğinin artması da sağlanacaktır. Bu malzemelerin hafif olması yapıların taşıyıcı sistemlerinde ekonomi sağlandığı gibi, deprem yüklerine karşı güvenliği de arttırmaktadır.

Doğal zeolitlerin kullanılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliği ile ısıtma ve soğutma sistemlerinin hem ilk yatırımlarında hem de yapıların kullanımları süresince ortaya çıkan enerji harcamalarında önemli tasarruflar sağlayacaktır. Bu malzemelerin istenilen boyutlarda üretilebilmesi, ahşap gibi kolay işlenebilmesi, delme ve oyma işlemlerinin çok kolay gerçekleşebilmesi, milimetrik duyarlıdaki boyutları nedeniyle düzgün derzler elde edilmesi, sıva işlemlerinin en az kalınlıklara indirilmesi mümkündür. Bütün bunların sonucunda elde edilen düzgün yüzeyler nedeniyle bu malzemelerin üretilmesi, yapımcılara çağdaş teknolojinin üstün özelliklerini sunacaktır.

Doğal zeolitlerden yapılan hafif yapı malzemelerinin, taşıma ve işçilik giderlerinde önemli tasarruf sağlayacağı bir gerçektir. Bu malzemeler ile yapılan yapının ağırlığı azalacak ve deprem güvenliği artacaktır. Bu malzemelerden yapılan blokların düzgün yüzeyli ve düzgün kenarlı olması, duvarların sıvasız bırakılmasına veya sadece ince sıva ile sıvanması olanak verecektir. Bu malzemelerin çeşitli yüksek dayanım gücüne sahip türde üretilmeleri mümkündür. Bu malzemeler yüksek düzeyde ısı yalıtım özelliğine sahiptirler. Doğal zeolitlerin özelliklerinden dolayı bu malzemeler, iklim ve çevre koşullarından etkilenmez. Dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Bu malzemelerin hafifliği nedeniyle, büyük boyutlarda üretilmesi mümkündür. Büyük boyutlu ve düzgün yüzeyli bloklarla duvar örülmesi özel bir beceri gerektirmez. Ahşap gibi kesilebilir, delinebilir, tesisat kanalları açılabilir. Bu özellikleri ile yapıyı hızlandırır, malzeme israfını ortadan kaldırır. Doğal zeolitlerden yapılan bu yapı malzemelerinin atışe dayanıklı olması yangın güvenliğini artırır ve yangından korunmuş mekânların yaratılmasını sağlar.

## BÖLÜM 5

### MALZEME VE YÖNTEM

Araştırmada kullanılan zemin numunelerinin özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak öncelikle tanımlama ve sınıflama deneyleri (elek analizi, kıvam limiti, özgül gravite deneyi) yapılmıştır. Örneklerin kompaksiyon karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak da kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Belirlenen kompaksiyon karakteristiklerine bağlı olarak numunelerin şişme potansiyellerini değerlendirmek amacıyla şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyi, dispersibilite özelliğini belirlemek amacıyla iğne deliği ve dağılma deneyine ilaveten serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Örneklerin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılmasında ilgili standart yöntemlere uyulmuştur (ASTM-1994). Çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışma programı Çizelge 5.1 de sunulmaktadır.

#### 5.1. Malzeme

Doğal zemin numunelerinin özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, kıvam limiti ve özgül gravite deneyleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan zemin numuneleri Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS) göre numune 1 ve 2; düşük plastisiteli kil (CL), numune 3 ve 4; yüksek plastisiteli kil (CH) olarak tanımlanmıştır. Çizelge 5.2’de numunelerin tanımlama deney sonuçları, Çizelge 5.3’te numunelerin kimyasal analiz sonuçları ve Şekil 5.1’de ise numunelere ait granülometre eğrileri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışma programı

|                                     | Deney                         | Numune sayısı |       |        |
|-------------------------------------|-------------------------------|---------------|-------|--------|
| Tanımlama ve Sınıflama<br>Deneyleri | Tane dağılımı                 |               |       |        |
|                                     | -Elek analizi                 | 4             |       |        |
|                                     | Kıvam limitleri               |               |       |        |
|                                     | -Likit limit                  | 4             |       |        |
|                                     | -Plastik limit                | 4             |       |        |
|                                     | Özgül gravite                 | 4             |       |        |
|                                     | Kompaksiyon karakteristikleri |               |       |        |
|                                     | -Standart proctor             | 4             |       |        |
| Şişme<br>Deneyleri                  | Şişme yüzdesi                 | 4*8           |       |        |
|                                     | Şişme basıncı                 | 4*8           |       |        |
| Dispersibilite<br>Deneyleri         | Dağılma deneyi                | 4*8           |       |        |
|                                     | İğne deliği deneyi            | 4*8           |       |        |
| Dayanım<br>Deneyleri                | Serbest basınç deneyi         | Kür süresi    |       |        |
|                                     |                               | 1 gün         | 7 gün | 28 gün |
|                                     |                               | 4*8           | 4*7   | 4*7    |
| XRD                                 | X ışınımı kırınımı deneyi     | 4             |       |        |
|                                     | TOPLAM                        | 240           |       |        |

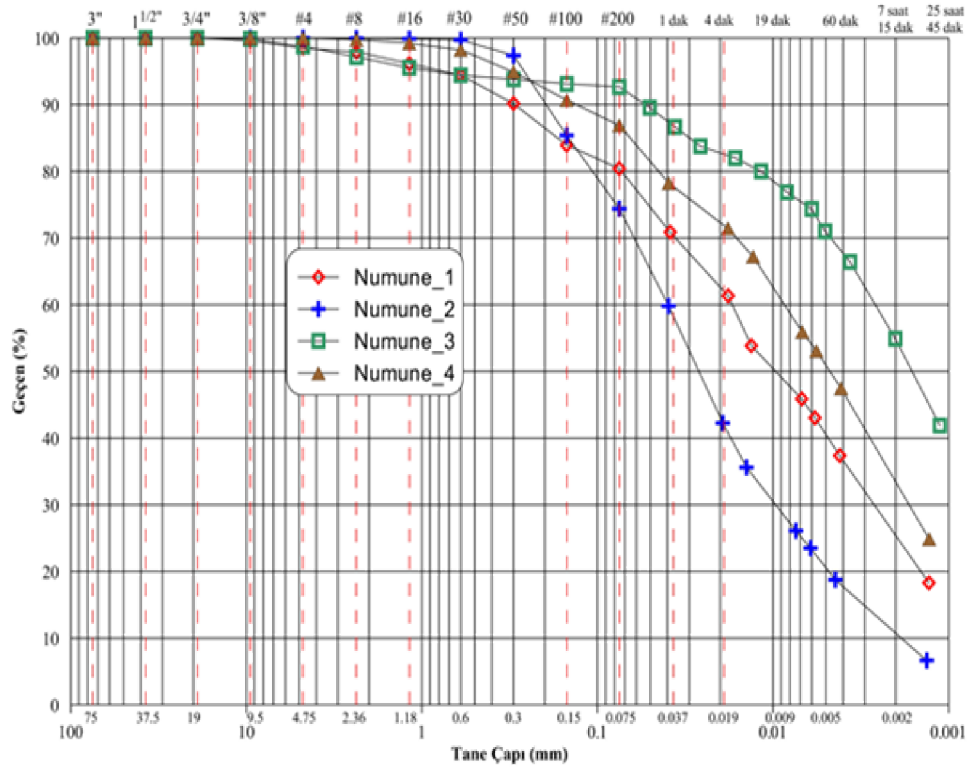
Çizelge 5.2. Numunelerin tanımlama deney sonuçları

| Numune No | <0.076 mm | <4.76 mm | LL (%) | PL (%) | PI (%) | Özgül gravite | Grup Sembolü |
|-----------|-----------|----------|--------|--------|--------|---------------|--------------|
| 1         | 80.4      | 98.5     | 43     | 26     | 17     | 2.66          | CL           |
| 2         | 74.4      | 100      | 30     | 19     | 11     | 2.68          | CL           |
| 3         | 92.7      | 98.7     | 68     | 31     | 37     | 2.79          | CH           |
| 4         | 86.9      | 100      | 68     | 33     | 35     | 2.61          | CH           |

Çizelge 5.3. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları

| Numune No | İletkenlik<br>(mmhos/cm) | pH    | TDS <sup>(*)</sup><br>(meg/L) | Na<br>(%) | SAR    | ESP<br>(%) |
|-----------|--------------------------|-------|-------------------------------|-----------|--------|------------|
| 1         | 2.460                    | 8.85  | 22.45                         | 89.09     | 18.65  | 33.15      |
| 2         | 13.190                   | 10.72 | 105.64                        | 98.77     | 129.42 | 44.94      |
| 3         | 0.806                    | 8.14  | 7.45                          | 8.05      | 0.33   | 1.18       |
| 4         | 20.600                   | 8.55  | 143.19                        | 92.30     | 56.36  | 33.85      |

TDS: Toplam Çözünen Tuz , Na: Sodyum yüzdesi,  
SAR: Sodyum Adsorpsiyon Oranı, ESP: Değişebilir Sodyum Yüzdesi.



Şekil 5.1. Numunelere ait tane dağılımı eğrileri

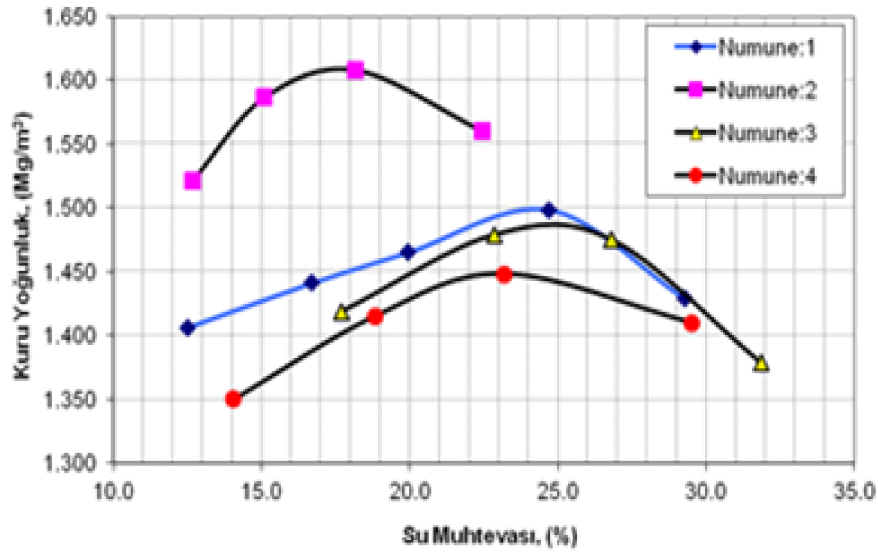
Kompaksiyon karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik, standart Proctor enerji seviyesinde kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Çizelge 5.4'te numunelerin kompaksiyon karakteristikleri ve Şekil 5.2'de numunelere ait kompaksiyon eğrileri verilmiştir.

Çizelge 5.4. Numunelerin kompaksiyon karakteristikleri

| Numune No | Grup Sembolü | Kompaksiyon Karakteristikleri |                      |
|-----------|--------------|-------------------------------|----------------------|
|           |              | $\rho_{dmaks}(Mg/m^3)^{(*)}$  | $W_{opt}(\%)^{(**)}$ |
| 1         | CL           | 1.500                         | 24.1                 |
| 2         | CL           | 1.608                         | 18.2                 |
| 3         | CH           | 1.487                         | 25.2                 |
| 4         | CH           | 1.448                         | 23.2                 |

(\*) En Büyük Kuru Yoğunluk

(\*\*) Optimum Su Muhtevası



Şekil 5.2. Numunelerin kompaksiyon eğrileri



### 5.1.1. Çalışmada kullanılan katkıların özellikleri

Araştırmada kullanılan zeolit (doğal puzolan) Rota Madencilik Anonim Şirketi'nden alınmış olup genel özellikleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada Portland çimentosu (CEM I 42.5 R) kullanılmıştır. Genel özellikleri çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.5. Kullanılan zeolit özellikleri

| Özellik                            | Zeolit   |
|------------------------------------|----------|
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.2-2.4  |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 65-72    |
| CaO (%)                            | 2.4-3.7  |
| MgO (%)                            | 0.9-1.2  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 10-12    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0.7-1.9  |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0.1-0.65 |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 2.1-3.5  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0-0.01   |
| Kızdırma kaybı (%)                 | 9-14     |
| Toplam CEC (meq/g)                 | 1.5-2.1  |

## 5.2. YÖNTEM

### 5.2.1. Elek Analizi

Elek analizi için, etüvde ortalama 105 °C 'de 24 saat kurutulan zemin malzemesi gerekir. Numune kil ve silt sınırı olan 0.075 mm. açıklıklı (200 no'lu) elek üzerinde elek altından çıkan su berraklaşana kadar yıkanmıştır. Elek üzerinde kalan numune etüvde 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Kalan numune tartılarak yıkama esnasındaki kayıp (silt ve kil) miktarı belirlenir. Bu numune büyükten küçüğe doğru sıralanmış eleklerden (3/8#, 4#, 8#, 16#, 30#, 50#, 100# ve 200#) elenerek elek üzerinde kalan ve

başlangıçta kullanılan zemin miktarına göre elekten geçen yüzdelere belirlenerek granulometri eğrisi çizilir. Dört numune içinde aynı deney tekrarlanmıştır. Deneyde TS 1900-2 ve BS 1377 standardı göz önüne alınarak uygulama yapılmıştır.

Çizelge 5.6. Kullanılan Çimentonun özellikleri (Rota Madencilik).

| Özellik                            | Çimento |
|------------------------------------|---------|
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3.10    |
| Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)   | 3410    |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 19.52   |
| CaO (%)                            | 64.08   |
| MgO (%)                            | 1.72    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 4.84    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 2.68    |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 2.40    |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0.41    |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 0.61    |
| Kızdırma kaybı (%)                 | 3.70    |
| Toplam alkali (%)                  | 0.81    |
| Serbest kireç (%)                  | 1.15    |
| C3S (%)                            | 64.18   |
| C2S (%)                            | 7.57    |
| C3A (%)                            | 8.29    |
| C4AF (%)                           | 8.15    |

### 5.2.2. Kıvam Limitleri

Kıvam, kohezyonlu zeminlerde zeminin sertlik-yumuşaklık durumunun ölçüsüdür. Plastiklik veya plastisite ise ince taneli zeminlerde kırılmadan şekil verilebilmeyi ifade eder. Likit kıvamda zemin kendi ağırlığı altında yavaşça akabilir. Plastik durumda zemine istenilen şekil kolayca verilebilir. Yarı katı durumda zemine istenilen şekil zorlukla verilir, zeminde çatlamlar oluşur. Katı durumda ise zemine şekil verilemez. Atterberg (1911), tarafından bu kıvamları ayıran sınır su muhtevaları

tanımlanmıştır. Ayrıca numuneler 24 saat boyunca küre tabi tutulmuştur. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 4318 standardı uygulanmıştır.

#### **5.2.2.1. Likit limit deneyi**

Kullanacağımız kil malzeme öncelikle 40 nolu elekten geçirildi, 150-200 gr. Zemin saf su ile homojenleştirilerek Casagrande aletine yerleştirildi. Aletin özel bıçağı ile zemin tabanında göz kararı ile 2 mm. genişliğinde oyuk açılır. Casagrande aletine yerleştirilen numune 1 cm yükseğe çıkıp yüzeye düşmektedir. Alet yaklaşık 2 devir/sn hızla çevirilmelidir. Bu işlem ortadaki oyuk birleşinceye kadar devam eder. Bu andaki vuruş sayısı ve numunenin su muhtevası deney föyüne kaydedilmiştir. 25 vuruş sayısına karşılık gelen su muhtevası numunenin likit kıvamdaki su muhtevasıdır. Bu deney dört numunemiz içinde yapılmıştır.

#### **5.2.2.2. Plastik limit deneyi**

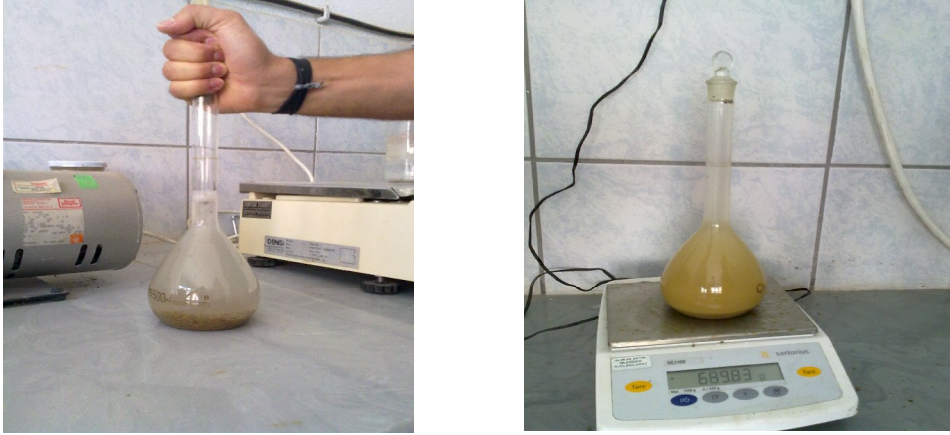
24 saat etüvde kurutulmuş ve 40 nolu elekten elenerek hazırlanan numuneler homojen olacak şekilde saf su ile karıştırılarak plastik kıvama getirilir. Daha sonra cam levha üzerine konarak avuç içiyle göz kararı 3 mm çaplı silindirler oluşturulmuştur. Kopma ve çatlama başladığı andaki su muhtevası plastik limit kıvamlarını vermiştir.

#### **5.2.3. Özgül Gravite Deneyi**

Malzemenin birim hacmindeki ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Zeminlerin dane özgül ağırlığı, birim hacim ağırlığı gibi malzemenin hacim ve ağırlık ilişkisinin tespit edilmesi için gereklidir. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 422-63 standardı uygulanmıştır.

Numunelerin özgül ağırlığı ( $G_s$ ) bir piknometre ve vakum cihazı yardımıyla tayin edilmiştir. Piknometre şişesi kapağı ile beraber etüvde kurutulduktan sonra tartılmıştır ( $W_1$ ). Etüvde kurutulmuş bir miktar zemin numunesi piknometre şişesine doldurulur ve tartılır ( $W_2$ ). Piknometre şişesi üç aşamada doldurulacak şekilde havası alınmış saf su ilave edilerek içerideki hava vakum uygulanarak dışarıya atılmış ve tekrar tartım yapılmıştır ( $W_3$ ). Daha önceden piknometre içerisine sadece su doldurularak tartım yapılmıştır ( $W_4$ ).

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{W_4 + (W_2 - W_1) - W_3}$$



Şekil 5.3. Özgül ağırlık deneyinde vakum uygulaması ve tartma işlemi.

#### 5.2.4. Standart Proctor Kompaksiyon Deneyi

Deneyin kullanılmasındaki amaç optimum su muhtevasının tespitidir. Deney dört numunemiz için tekrarlanmıştır. Hazırlanan numuneler 24 saat kürde bırakılmıştır. Deneyde kullanılacak zemin numunesi (kuru ağırlığı üzerinden hesaplanır) üç tabaka halinde serilir ve her bir tabaka 30,5 cm den serbest düşen 2,5 kg. ağırlığındaki bir

tokmakla 25 vuruş ile sıkıştırılmıştır. Kullanılan tokmak ve vuruş sayılarının standart olması sebebiyle zemine sıkıştırma yolu ile verilen enerji de standarttır. Kullanılan moldun içindeki sıkıştırılmış zeminin yaş ağırlığı belirlendi. Sıkıştırılmış zeminin su muhtevasının belirlenmesi için, alttan ve üstten olmak üzere iki yerden numune alınmıştır ve bu iki değerin ortalaması hesaplarda esas olmuştur. Bulunan su muhtevası değeri ( $\omega$ ) kullanılarak, kuru birim hacim ağırlığı ( $\rho_d$ ) bulunmuştur. Ayrıca deney değişik su muhtevaları için hazırlanmış numuneler üzerinde tekrarlanmak suretiyle proktor eğrisi, dolayısıyla da optimum su içeriğiyle maksimum kuru birim hacim ağırlıklar elde edilmiştir. Deneyde TS 1900-1 ve ASTM D 1557 - ASTM D 698 göz önüne alınmıştır.

#### **5.2.5. Şişme Yüzdesi ve Şişme Basıncı Deneyleri**

Araştırmada, numunelerin şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri direkt yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Bu esasa, şişme basıncının belirlenmesinde Potensial Volume Change (PVC) meter ekipmanı kullanılmıştır. PVC metre deneyinin yapılmasına ait standart bir yöntem bulunmamaktadır. Çalışmada Lambe tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Lambe, 1960). Şekil 5.4'te bu kapsamda kullanılan ekipmanlara ait laboratuvar konumları sunulmaktadır.

##### **5.2.5.1. Şişme yüzdesi**

Şişme yüzdesi; bir zemin numunesinin yatay yönlerde hacim değiştirmesi engellendiği durumda, sabit bir sürşarj yüklemesi altında su altına bırakılması durumunda tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimi olarak tanımlanmaktadır.

Şişme yüzdesinin belirlenmesinde kullanılan genleşme indisi deneyi ASTM D 4829 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Optimum su muhtevası değerlerinde

belirli kuru ağırlıklarda numuneler hazırlanmış ve su kaybını önlemek amacıyla koruma altına alınmıştır. Numuneler 24 saatin sonunda deney için hazırlanmıştır. Bu kapsamda yapılan şişme deneyleri; standart şişme kalıbının boyutları belli olduğundan (D=70 mm ve H=20 mm) kalıba yerleştirilecek malzeme miktarı belli olup 3 tabakada sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma işlemi sonrasında numuneler ekipmana yerleştirildi ve suya doygun hale getirildi. Şişme potansiyelinin önemli bir değişkeni olan şişme yüzdesi, 7 kPa basınç altında suya boğulan numunenin 24 saat veya şişme tamamlanana kadar gelişen nihai deformasyonun, numunenin başlangıç boyuna oranıdır. Numunelerin suya boğulmasından hemen sonra, farklı zaman aralıklarında sisteme bağlı dijital deformasyon saatlerinden (0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, 240, 360 .... 2880 dakika) şişme yüzdesi değişimleri ölçülmüştür.

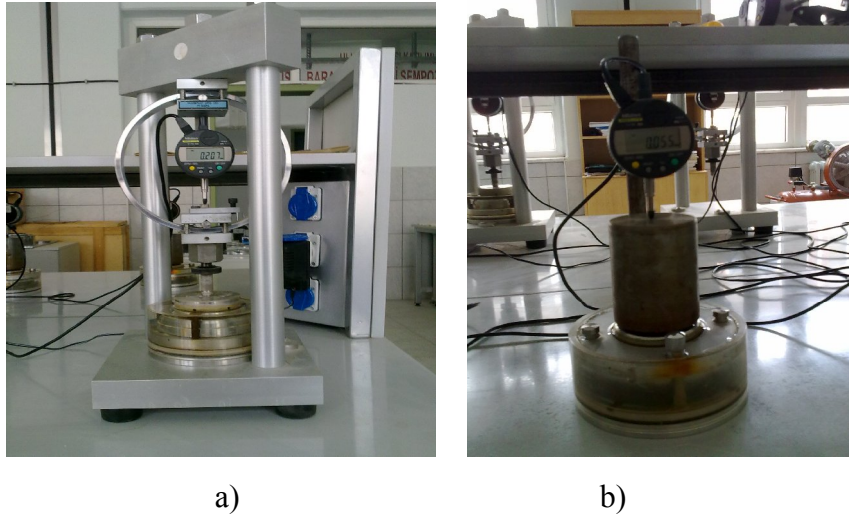
#### **5.2.5.2. Şişme basıncı**

Şişme basıncı; bir zemin numunesinin yatay yönde hacim değiştirmesi engellendiğinde, su altında bırakıldığında tek boyutta meydana getirebileceği hacim değişimini engellemek için uygulanması gereken düşey basınçtır.

Bu esasa, şişme basıncının belirlenmesinde PVC metre ekipmanı kullanılmıştır. PVC metre deneyinin yapılmasına ait standart bir yöntem bulunmamaktadır. Çalışmada Lambe tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır (Lambe, 1960). PVC metre deneyin esası, sıkıştırılmış zemin numunesinin ıslatılmasından sonra gelişen şişme deformasyonunun engellenmesiyle oluşan basıncının belirlenmesidir. Yük halkası kolu, sıkıştırması yapılan ve sisteme yerleştirilen numune üzerine gelecek şekilde yerleştirilir. Numune suya boğulur ve belirli aralıklarla yük halkasından değer okunur. Yük halkasından okunan değer, kalibrasyon eğrisi kullanılarak veya yük halka faktörüyle çarpılarak birimi bilinen yüke çevrilir. Yükün numune alanına bölünmesiyle basınç değeri elde edilir.

### 5.2.6. Dispersibilite Deneyleeri

Dispersif killer, inşaat mühendisliği pratiğinde sıkça kullanılan, elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri limitleri, konsolidasyon, kompaksiyon gibi klasik laboratuvar indeks deneyleeri ile tanımlanamamaktadır. Bu yüzden özel deney prosedürleri geliştirelmıştır. Bu çalışma kapsamında hem katkısız hem de katkılı numunelere ABD Su İşleri Teşkilatı (USBR) standart yöntemleri dikkate alınarak iğne deliği deneyleeri ve dağılma deneyleeri uygulanmıştır (USBR 5400; USBR 5410; 1989).



Şekil 5.4. a) şişme basıncı, b) şişme yüzdesi

#### 5.2.6.1. Dağılma Deneyleeri

Bu deneyleerde, bir kenarı 15 mm ebadında küp şeklinde bir zemin numunesi 250 ml saf suyun içerisinde dikkatlice yerleştirilir. Zeminin su ile reaksiyona girmesi ile kolloidal ( $<0.002$  mm) boyutundaki parçacıklar ayrılmaya başlar ve su içinde süspansiyon haline geçer. Bu esaslarla belirli zaman aralıklarında gözlemler yapılarak sınıflama yapılmıştır (USBR 5400, 1989). Oluşan bulanıklık derecesine göre zemin; bulanıklık yok denecek kadar az ise “Dispersif Değil”, az ise “Ara Zemin”, orta

derecede ise “Dispersif” ve yüksek bulanıklıkta “Çok Yüksek Dispersif” olarak tanımlanır.

### 5.2.6.2. İğne deliği deneyi

Bu deneylerden en güvenilir olarak kabul edilen iğne deliği deneyi, kil zeminlerin dispersibilite özelliğinin değerlendirilmesi için önerilmiş fiziksel ve nicel sonuçlar sunan bir deney yöntemidir. Deneyde, standart Proctor enerji seviyesinde sıkıştırılmış 25 mm boya ve 33 mm çapa sahip silindirik zemin numunesi içine 1.0 mm çapında bir delik açılır. Saf su; 50, 180 ve 380 mm (hidrolik eğimleri yaklaşık 2, 7 ve 15) yük altında bu delikten geçirilir. Suyun akım debisi ve bulanıklılık derecesi kaydedilir. İğne deliği deneyinin yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesine yönelik aşamalar USBR 5410 (1989) standardında uygun olarak ve deney sonuçlarına bağlı nicel değerlendirme de Acciardi (1985) tarafından önerilen şekliyle yapılmıştır. Şekil 5.5'de deney anından bir görüntü sunulmaktadır.



Şekil 5.5. Dispersibilite deneyi uygulaması

Deney sonucunda malzeme 50 mm su yükü altında hızla dağılıyorsa “dispersif”, 50 veya 180 mm yük altında yavaşça erozyona uğruyorsa “ara zemin”, 380 veya 1020



mm yük altında erozyon gözlenmiyorsa “dispersif değil” olarak rapor edilir. Numune içinde açılan bu delikle, dolgu barajların geçirimsiz çekirdeğinde oluşabilecek bir çatlak ya da kaçak kanalının küçük ölçekte simülasyonu hedeflenmiştir. Deney ülkemizde ODTÜ ve DSİ laboratuvarlarında yapılmaktadır. Kullanılan deney düzeneği ve deney abağı şekil 5.6 ve şekil 5.7’de verilmiştir

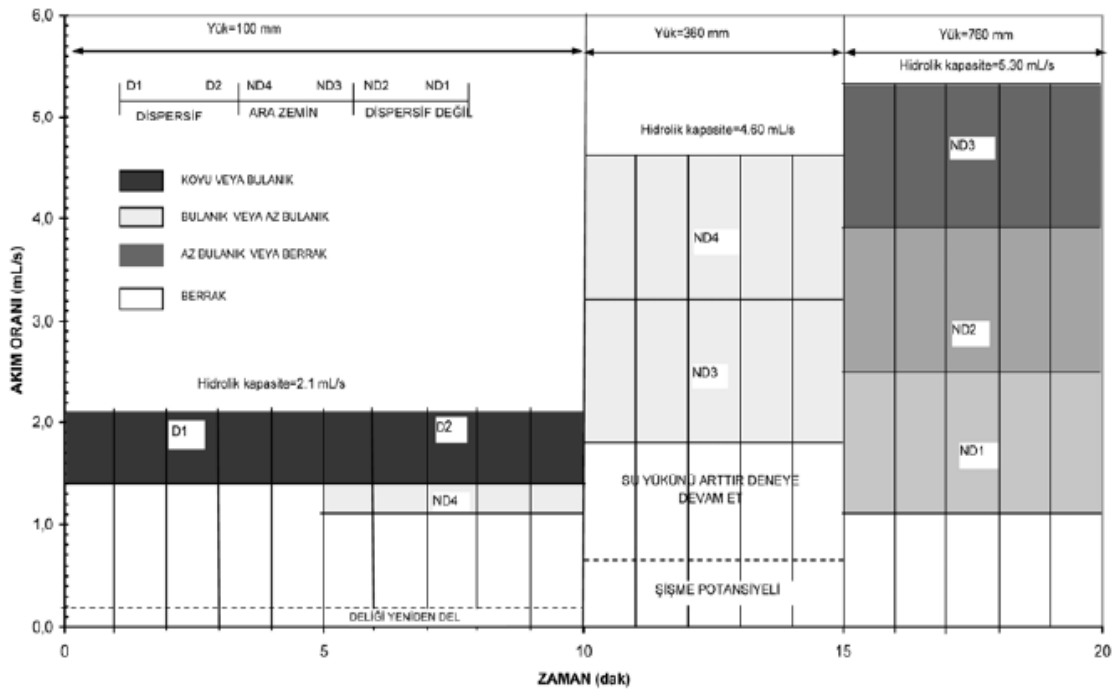


Şekil 5.6. İğne deliği deney düzeneği

### 5.2.7. Serbest Basınç Deneyi

Kayma dayanımının en basit şekilde ölçümü, numunenin düşey ekseninde basınç uygulanarak kırılması şeklindedir. Silindirik zemin numunesi yalnızca aksenal doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır (Şekil 5.8a). Bu deneyde, aksenal yük artışları altında meydana gelen numunenin boyunun kısalması yani aksenal şekil değişimi ölçülür ve gerilme şekil değiştirme eğrileri elde edilir (Şekil 5.8b). Aksenal gerilmenin en büyük değeri (veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri) zeminin serbest basınç dayanımı ( $q_u$ ) değerini vermektedir. Serbest basınç

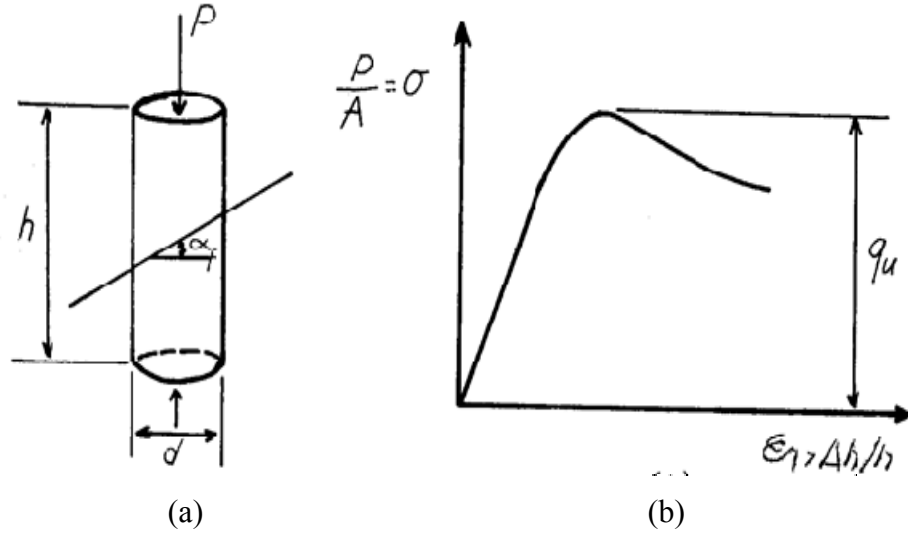
deneyini özel bir deney olarak tanımlamak mümkündür. Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yanal destek olmaksızın kendi kendini dik tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir. Bu yönden kumlar üzerinde uygulanması mümkün değildir. Yalnızca killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır. Drenaj koşulları kontrol edilemediğinden drenajsız kayma mukavemeti hızlı yükleme yapılarak elde edildiği varsayılır (Önalp, 2007). Şekil 5.10'da deney anından bir görüntü sunulmaktadır.



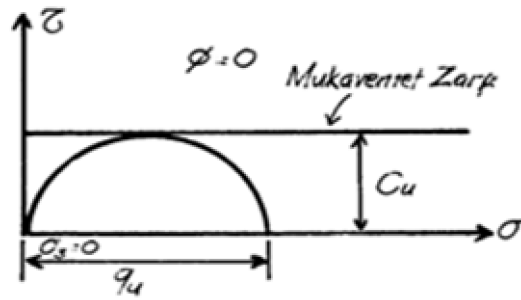
Şekil 5.7. İğne deliği deneyinde kullanılan tasarım kartı

Bu deneyde zemini konsolide etmek, boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün değildir. Ancak bu deney drenajsız kayma mukavemetini belirlemede en çok kullanılan deney yöntemidir. Bir serbest basınç deneyinde göçme anındaki gerilme durumunu gösteren Mohr dairesi ve drenajsız kayma mukavemeti zarfı Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Drenajsız kayma mukavemetinin  $\tau = c_u = q_u/2$  olarak elde edilebileceği bu sekilden açık olarak görülebilmektedir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme

başlıkları ile kesişmemesi için, boy uzunluğu/çap oranının  $h/d > 2$  olarak seçilmesi uygun olmaktadır.



Şekil 5.8. Serbest Basınç Deneyi ve Sonuçları (Özaydın 1997).



Şekil 5.9. Serbest Basınç Deney Sonuçlarını Gösteren Mohr Dairesi ve Mukavemet Zarfı (Özaydın 1997).



Şekil 5.10. Serbest basınç deney sistemi

### 5.2.8. XRD Deneyleri

X ışınları kırınımı deneyleri ince daneli zeminlerde mineral tayini ve kristal yapısının incelenmesi için en çok kullanılan deneylerden birisidir. X-Işınları Kırınımı, X-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılmaktadır. X-ışınları ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında bilgi veren güçlü bir yöntemdir. X-ışınları kırınımı günümüzde malzeme karakterizasyonu için endüstriyel ve bilimsel araştırmalarında; fizik, kimya, biyoloji, biyokimya, malzeme ve metalürji, jeoloji, madencilik, çimento, seramik ve teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, zemin numunelerinin mineralojik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla, Anadolu Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan X-ray Difraktometresi kullanılmıştır.

## BÖLÜM 6

### DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar; öncelikle tanımlama ve sınıflama deneyleri üzerinde yoğunlaştırılmış; daha sonra, çalışmanın amacına yönelik olarak şişme deneyleri, dispersibilite deneyleri ve dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, numunenin alınması, deneye hazırlanması ve deneylerin yapılmasında ASTM (1994) standart yöntemlerine uyulmuştur. Tanımlama deney sonuçlarına bağlı olarak numuneler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne (USCS) göre sınıflandırılmıştır (ASTM D 2487-00). Numunelerin dispersif ve şişme özellikleri belirlendikten sonra bu özelliklerin çimento ve zeolit karışımları kullanılarak katkı ilavesi ile değişimleri incelenmiştir. Bu kapsamda; şişme yüzdesi deneyi, şişme basıncı deneyi, dağılma deneyi, iğne deliği deneyi ve serbest basınç deneyleri her bir numune için belirlenen standart Proctor enerjisinde ve çimento yüzdesi (%3) sabit tutularak farklı yüzdelerde doğal zeolit (% 1, 3, 6, 10, 15 ve 20) karışımı katkı seviyelerinde hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney sonuçları ana başlıklar halinde sunulmaktadır.

#### 6.1. Şişme Deney sonuçları

Bu bölümde şişme deneylerine ait sonuçlar verilmektedir. Şişme deneyleri, %3 çimento ve farklı oranlarda zeolit katkısı içeren numunelerin şişme yüzdesi ve şişme basıncı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

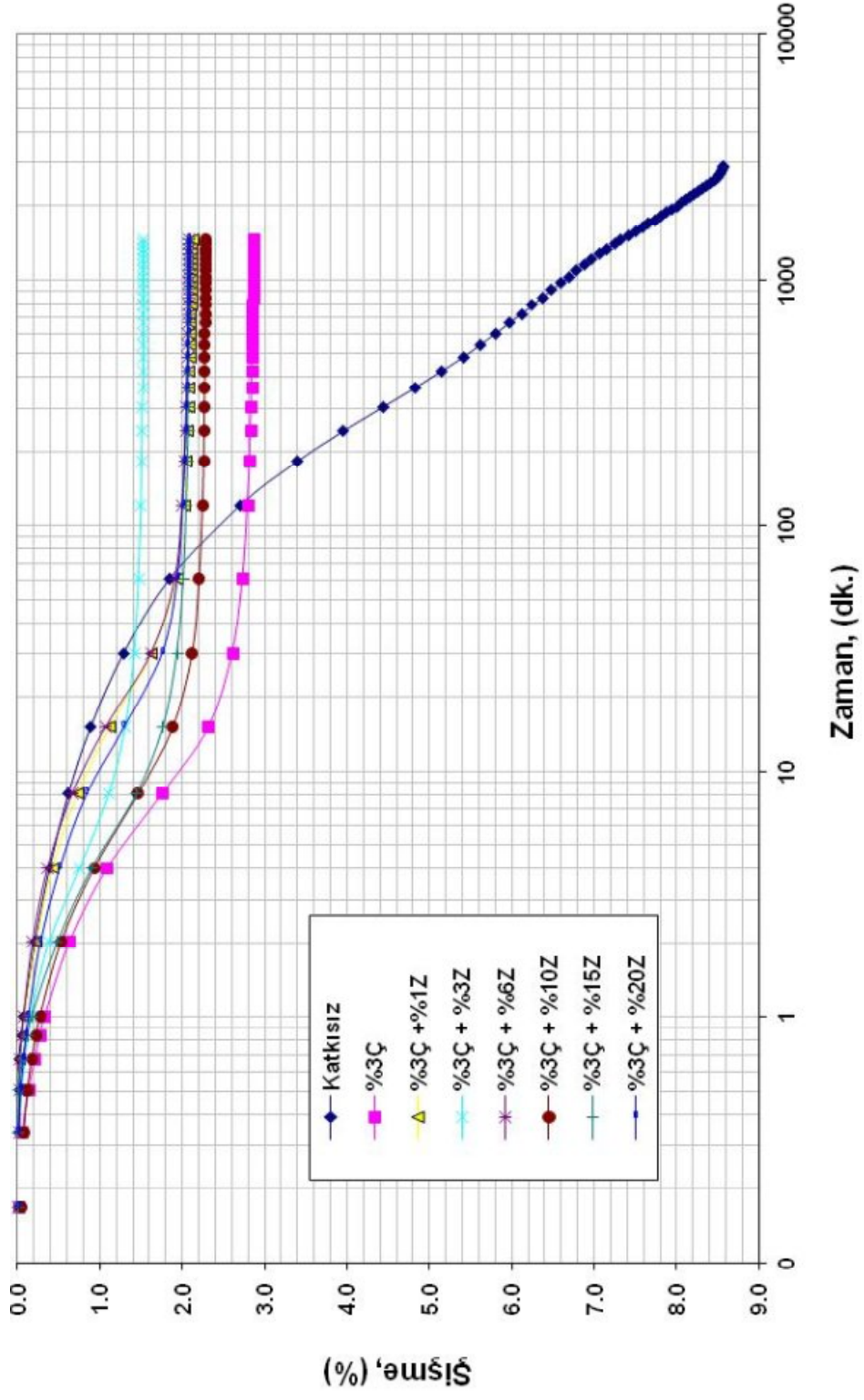
### 6.1.1. Şişme Yüzdesi Deney Sonuçları

Sonuçlar ilgili numuneler esasında ayrı ayrı incelendiğinde numune 1 için katkı oranlarına bağılı şişme yüzdesi zaman ilişkisi Şekil 6.1’de, şişme yüzdesindeki nihai değışimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.2 ve Çizelge 6.1’de sunulmaktadır. Artan katkı oranıyla beraber şişme yüzdesinde azalma olduğu özellikle katkısız durumda oluşun şişme yüzdesinin, sadece %3 çimento ilavesiyle beraber belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. %3 çimento ve % 6 zeolit katkılı numune ve sonrasında artan zeolit katkı yüzdelерinde küçük miktarda artış gözlenmiştir. Bu artışın sıkıştırmadan kaynaklandığı düşünölmektedir.

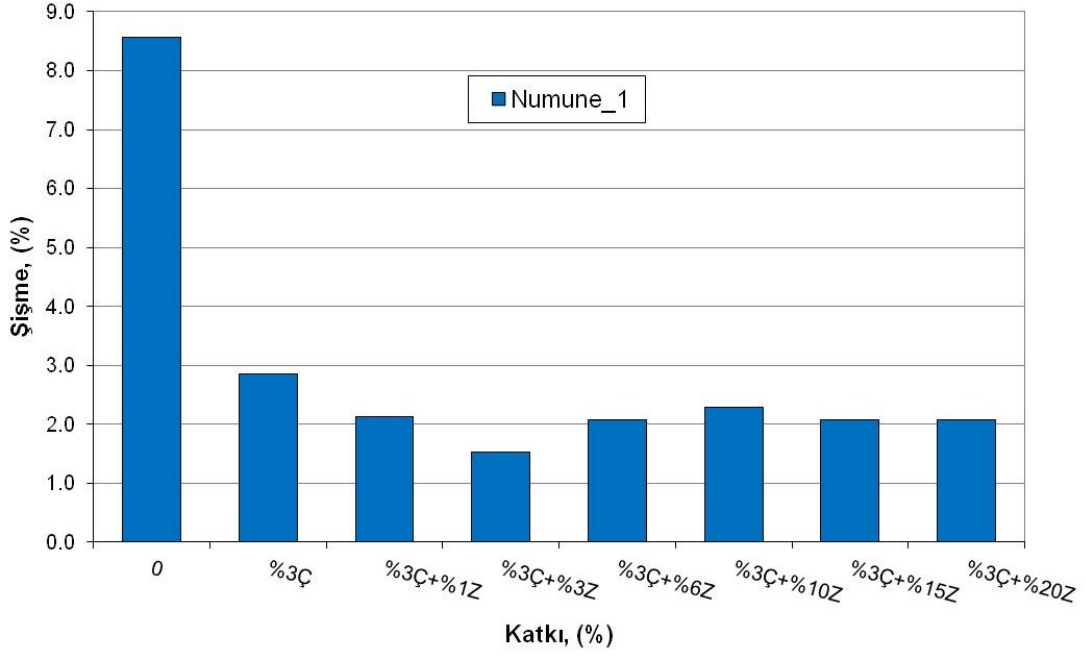
Numune 2 için katkı oranlarına bağılı şişme yüzdesi zaman ilişkisi Şekil 6.3’de, şişme yüzdesindeki nihai değışimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.4 ve Çizelge 6.2’de sunulmaktadır. Artan katkı oranıyla beraber %3 çimento ve %3 zeolit katkı oranına kadar şişme yüzdesinde azalma ortaya çıktığı gözökmektedir. Artan katkı oranlarında, şişme yüzdesinde artış meydana gelmiş ve %3 çimento+%6 zeolit katkı oranından sonra olumsuz etkilendiğı görölmüştür. Bu artış, %3 çimento ve %20 zeolit katkı oranında ilk şişme yüzdesindeki değeri geçmiştir.

Numune 3 için katkı oranlarına bağılı şişme yüzdesi zaman ilişkisi Şekil 6.5’de, şişme yüzdesindeki nihai değışimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.6 ve Çizelge 6.3’de verilmektedir. Artan katkı oranıyla beraber şişme yüzdesinde azalma ortaya çıktığı gözökmektedir. Özellikle %3 çimento ve %3 zeolit ilavesine kadar belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. %3 çimento ve %6 zeolit katkılı numune ve sonrasında küçük miktarda artış gözlenmiştir.

Numune 4 için katkı oranlarına bağılı şişme yüzdesi zaman ilişkisi Şekil 6.7’de, şişme yüzdesindeki nihai değışimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.8 ve Çizelge 6.4’de verilmektedir. Artan katkı oranıyla beraber şişme yüzdesinin azaldığı, özellikle %3 çimento ve %6 zeolit katkı seviyesinde daha belirgin olarak gerçekleştiğı görölmüştür.



Şekil 6.1. Numune 1 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi

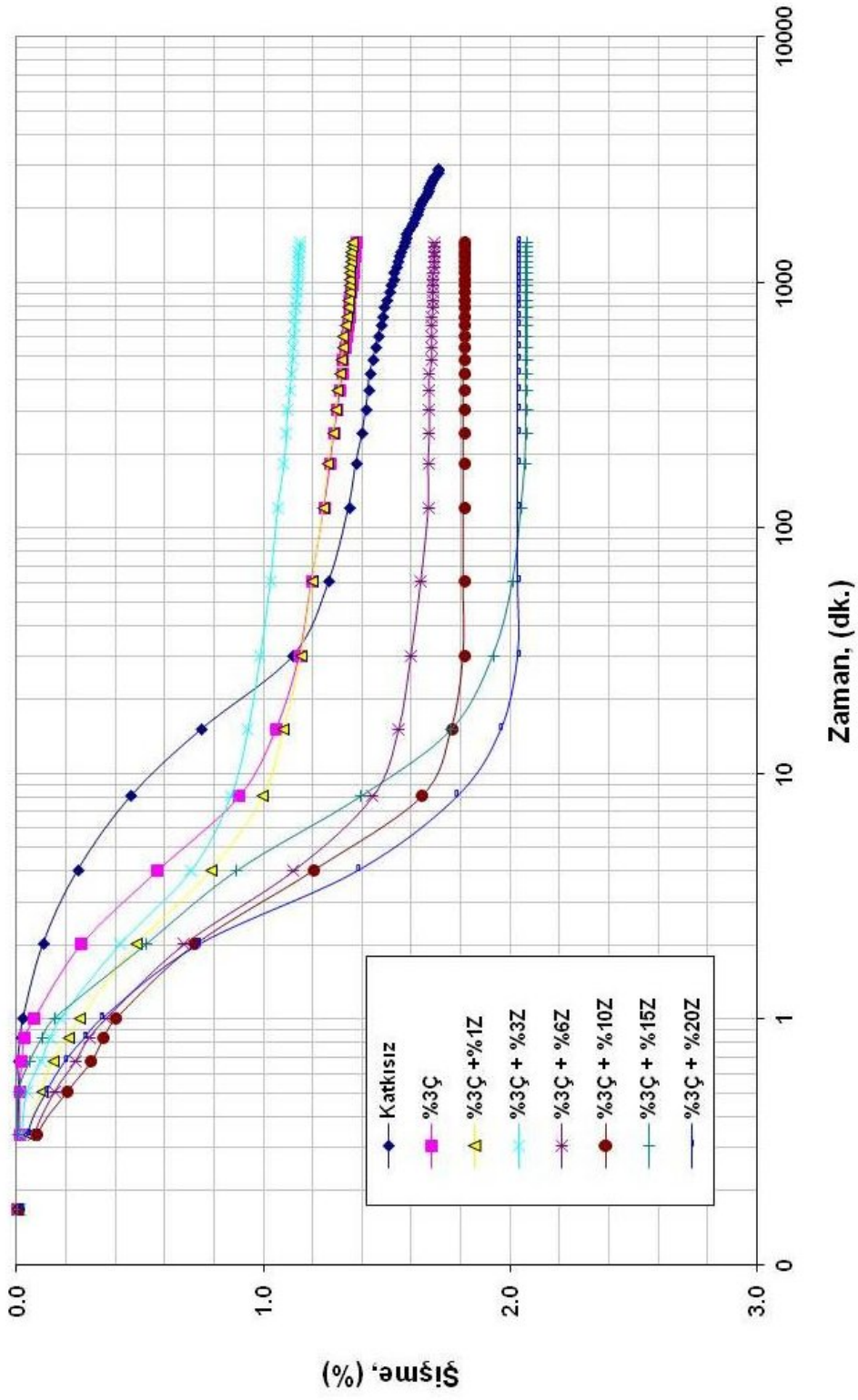


Şekil 6.2. Numune 1'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi

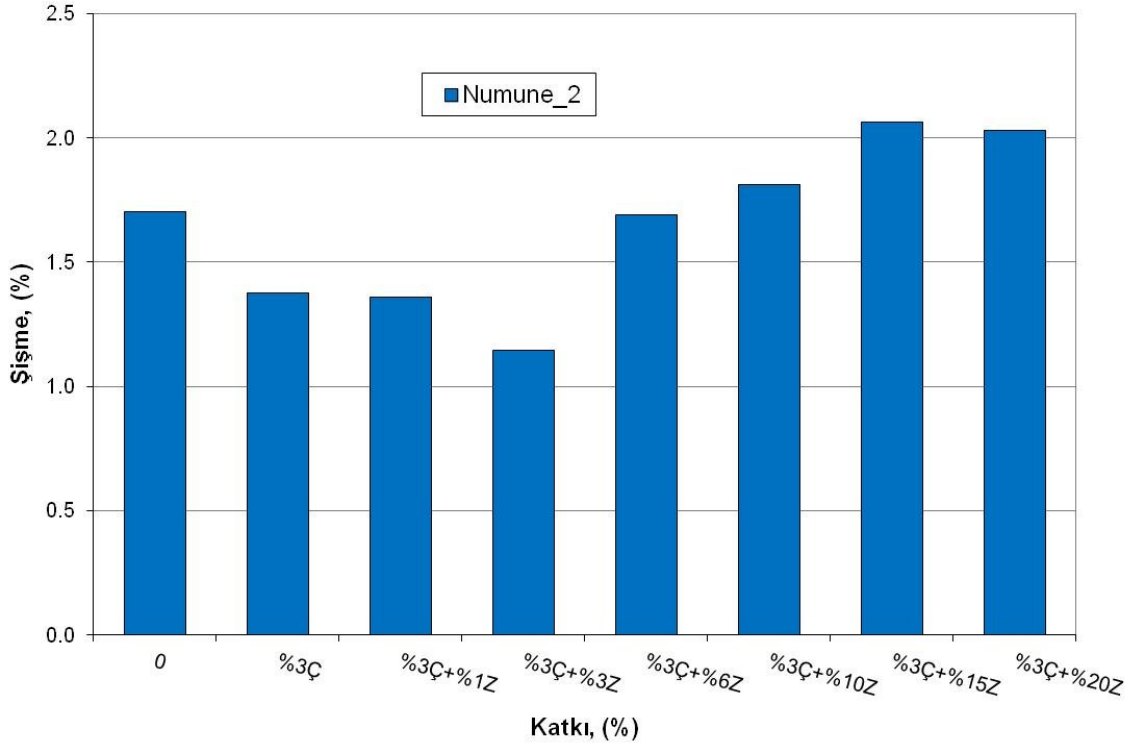
Çizelge 6.1. Numune 1'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları

| Katkı Oranı (%) | Şişme Yüzdesi (%) |
|-----------------|-------------------|
| Katkısız        | 8,56              |
| %3Ç             | 2,86              |
| %3Ç+%1Z         | 2,12              |
| %3Ç+%3Z         | 1,52              |
| %3Ç+%6Z         | 2,08              |
| %3Ç+%10Z        | 2,28              |
| %3Ç+%15Z        | 2,08              |
| %3Ç+%20Z        | 2,08              |





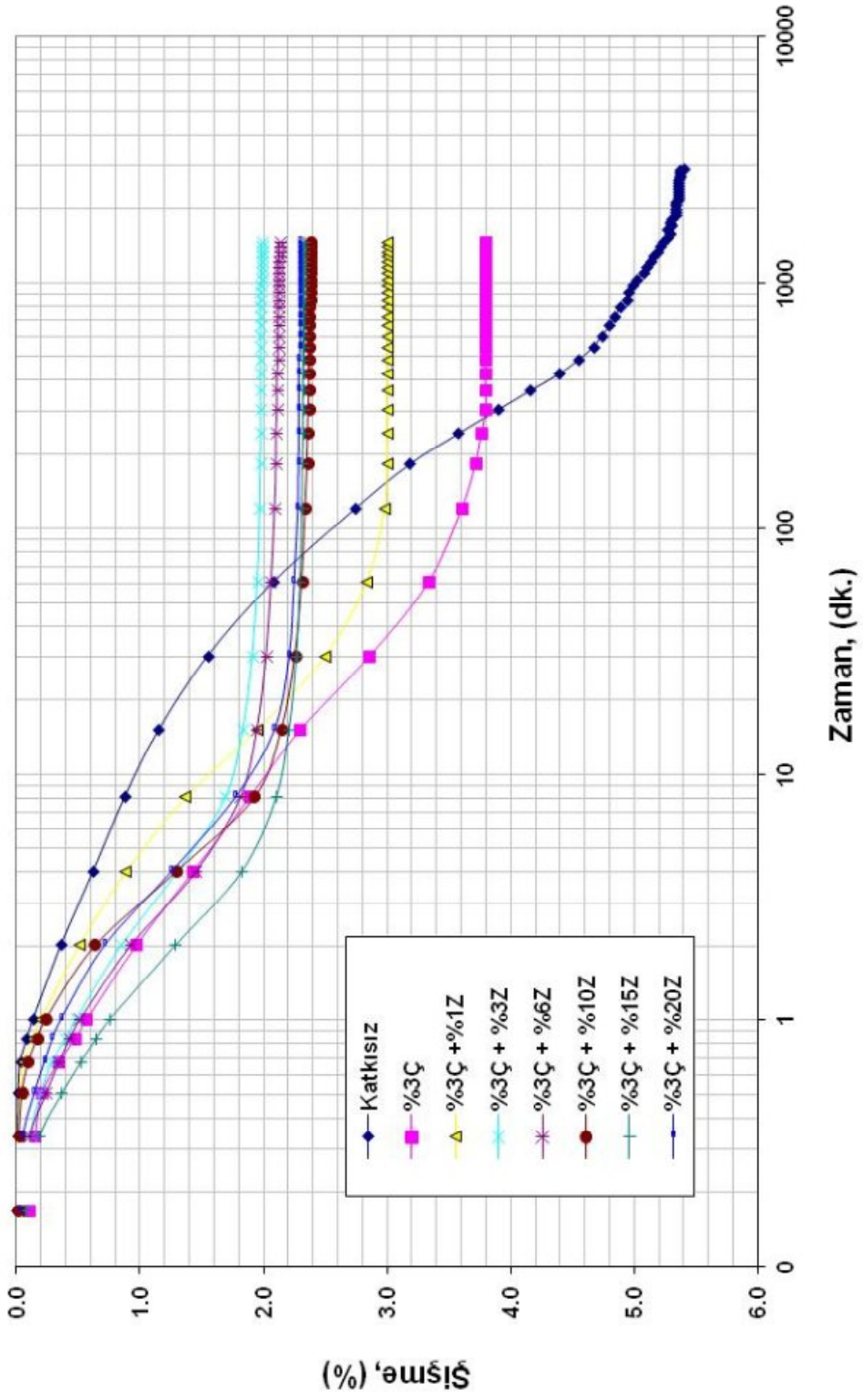
Şekil 6.3. Numune 2 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi



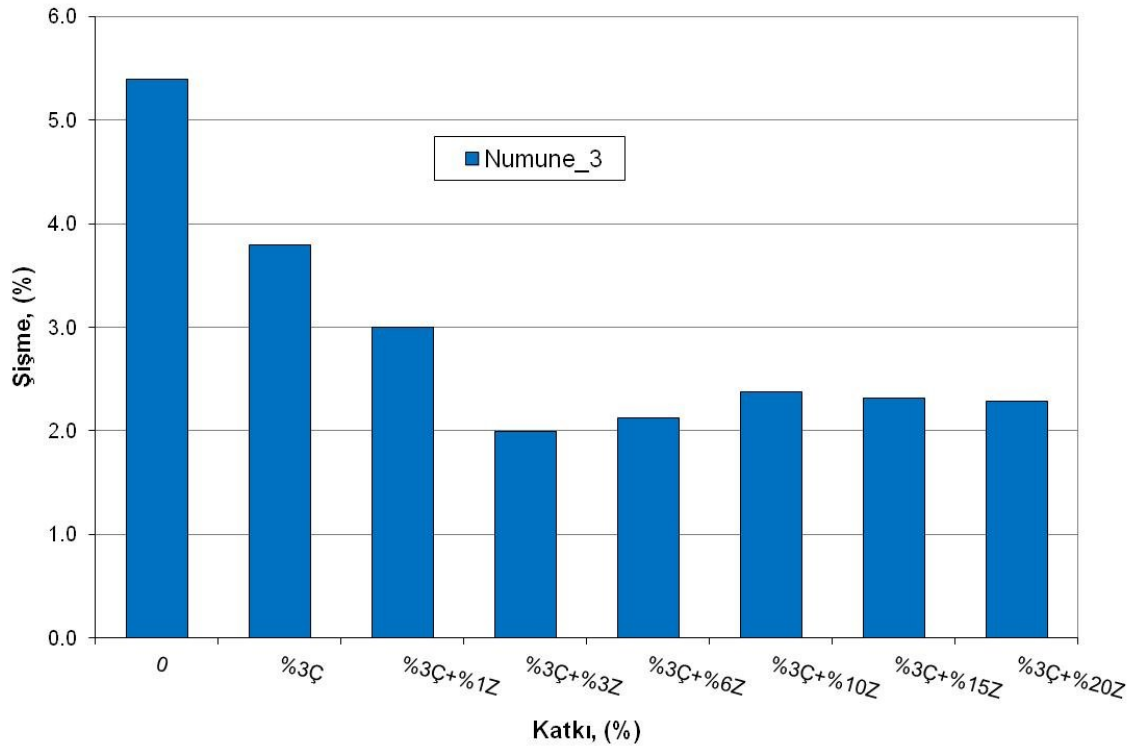
Şekil 6.4. Numune 2'ye ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi

Çizelge 6.2. Numune 2'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları

| Katkı Oranı (%) | Şişme Yüzdesi (%) |
|-----------------|-------------------|
| Katkısız        | 1,71              |
| %3Ç             | 1,38              |
| %3Ç+%1Z         | 1,36              |
| %3Ç+%3Z         | 1,15              |
| %3Ç+%6Z         | 1,69              |
| %3Ç+%10Z        | 1,81              |
| %3Ç+%15Z        | 2,07              |
| %3Ç+%20Z        | 2,03              |



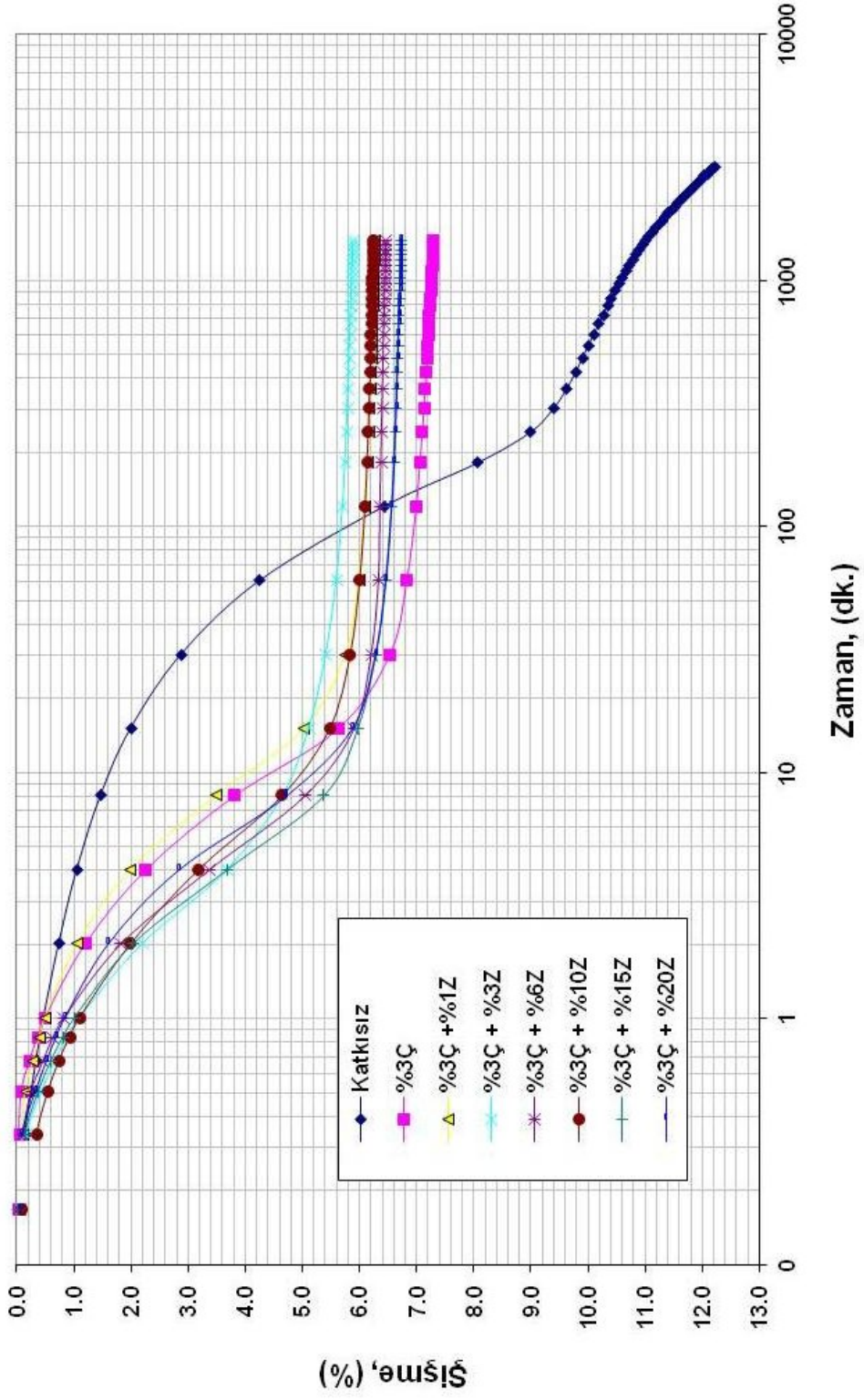
Şekil 6.5. Numune 3 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi



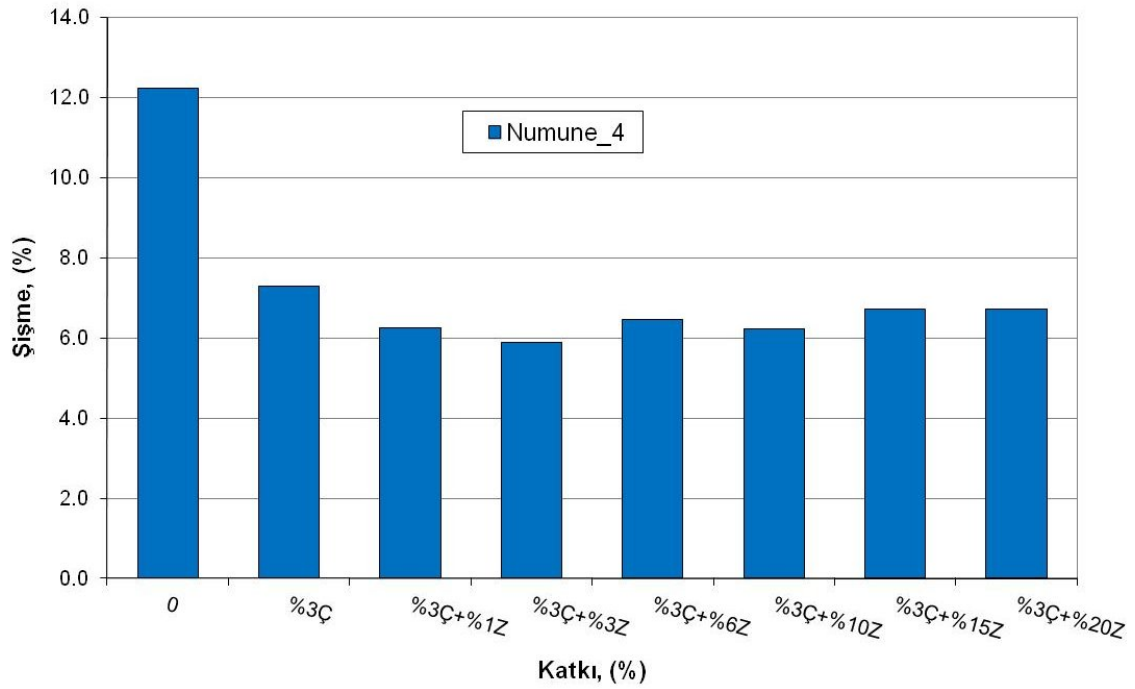
Şekil 6.6. Numune 3'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi değişimi

Çizelge 6.3. Numune 3'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçları

| Katkı Oranı (%) | Şişme Yüzdesi (%) |
|-----------------|-------------------|
| Katkısız        | 5,40              |
| %3Ç             | 3,80              |
| %3Ç+%1Z         | 3,00              |
| %3Ç+%3Z         | 1,99              |
| %3Ç+%6Z         | 2,13              |
| %3Ç+%10Z        | 2,38              |
| %3Ç+%15Z        | 2,32              |
| %3Ç+%20Z        | 2,29              |



Şekil 6.7. . Numune 4 için şişme yüzdesi zaman ilişkisi



Şekil 6.8. Numune 4'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme yüzdesi değişimi

Çizelge 6.4. Numune 4'e ait değişen çimento ve zeolit oranlarına göre şişme yüzdesi deney sonuçlar

| Katkı Oranı (%) | Şişme Yüzdesi (%) |
|-----------------|-------------------|
| Katkısız        | 12,22             |
| %3Ç             | 7,28              |
| %3Ç+%1Z         | 6,25              |
| %3Ç+%3Z         | 5,89              |
| %3Ç+%6Z         | 6,46              |
| %3Ç+%10Z        | 6,23              |
| %3Ç+%15Z        | 6,72              |
| %3Ç+%20Z        | 6,72              |

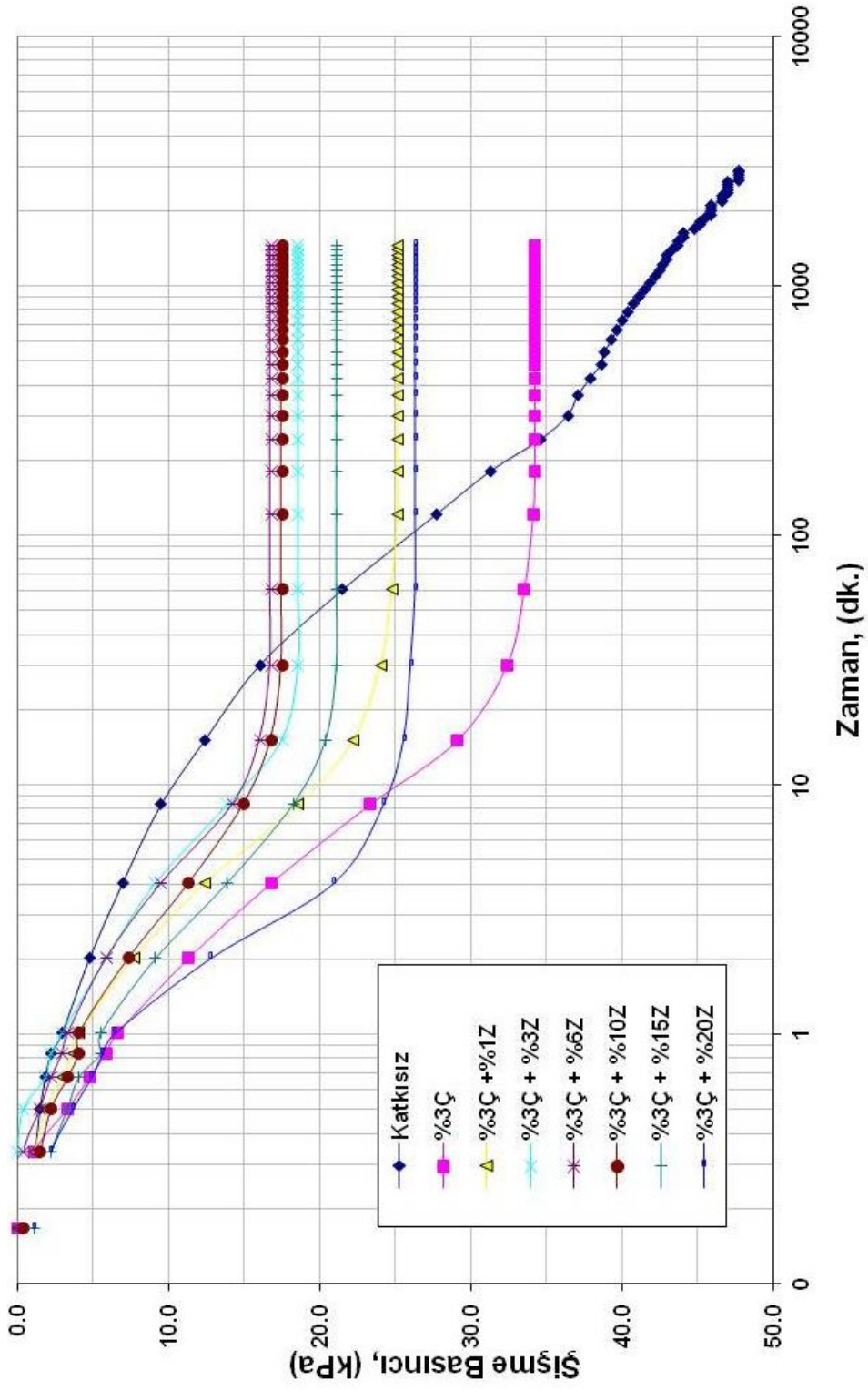
### 6.1.2. Şişme Basıncı Deney Sonuçları

Deneylerden elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirildiğinde; numune 1 için katkı oranlarına bağlı şişme basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 6.9'da, artan katkı oranlarında şişme basıncındaki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.10 ve Çizelge 6.5'de sunulmaktadır. Artan katkı miktarı ile şişme basıncı değerlerinde %3 çimento ve %6 zeolit miktarına kadar belirgin azalma sağlanmıştır. Ancak %3 çimento ve %10 zeolit katkısından sonra tekrar artış gözlenmiştir.

Numune 2 için katkı oranlarına bağlı şişme basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 6.11'de, artan katkı oranlarında şişme basıncındaki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.12 ve Çizelge 6.6'da verilmektedir. Artan katkı miktarı ile şişme basıncı değerlerinde %3 çimento ve %6 zeolit miktarına kadar azalma sağlanmıştır. Fakat %3 çimento ve %10 zeolit katkısından sonra tekrar artış gözlenmiştir.

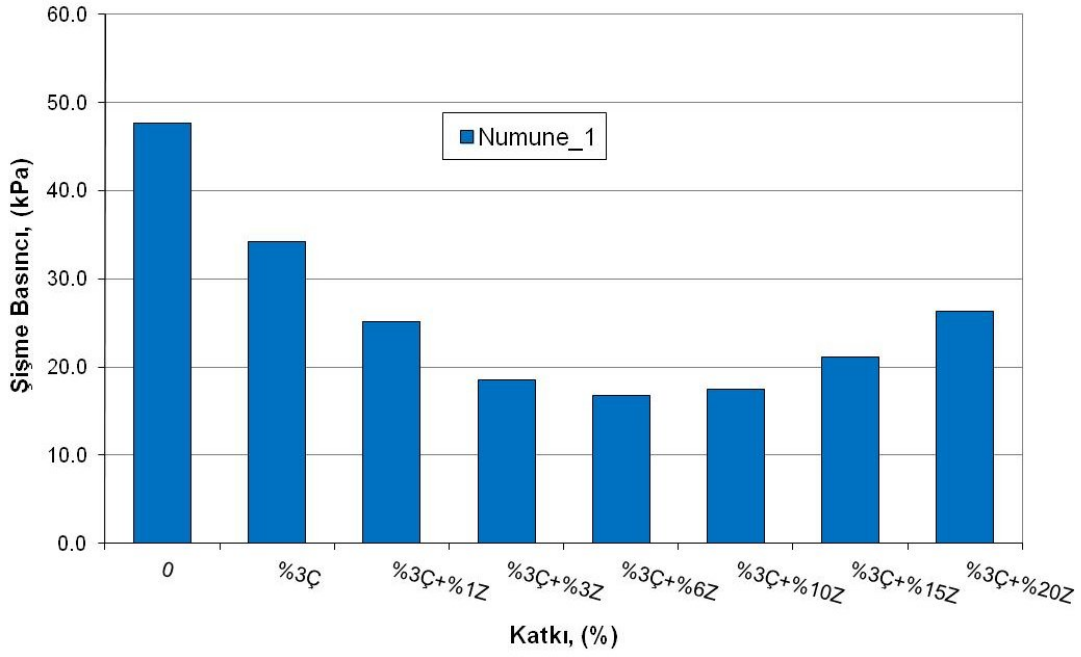
Numune 3 için katkı oranlarına bağlı şişme basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 6.13'de, artan katkı oranlarında şişme basıncındaki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.14 ve Çizelge 6.7'de verilmektedir. Artan katkı miktarı ile şişme basıncı değerlerinde %3 çimento ve %6 zeolit miktarına kadar azalma sağlanmıştır. Fakat %3 çimento ve %10 zeolit katkısından sonra tekrar artış gözlenmiştir. Bu artıştaki şişme basıncı, katkısız haldeki şişme basıncından daha az miktardadır.

Numune 4 için katkı oranlarına bağlı şişme basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 6.15'de, artan katkı oranlarında şişme basıncındaki nihai değişimler ve değerleri sırasıyla Şekil 6.16 ve Çizelge 6.8'de verilmektedir. artan katkı miktarı ile şişme basıncı değerlerinde %3 çimento ve %6 zeolit miktarına kadar azalma sağlanmıştır. Fakat %3 çimento ve %10 zeolit katkısından sonra tekrar artış gözlenmiştir.



Şekil 6.9. Numune 1'e ait şişme basıncı zaman ilişkisi

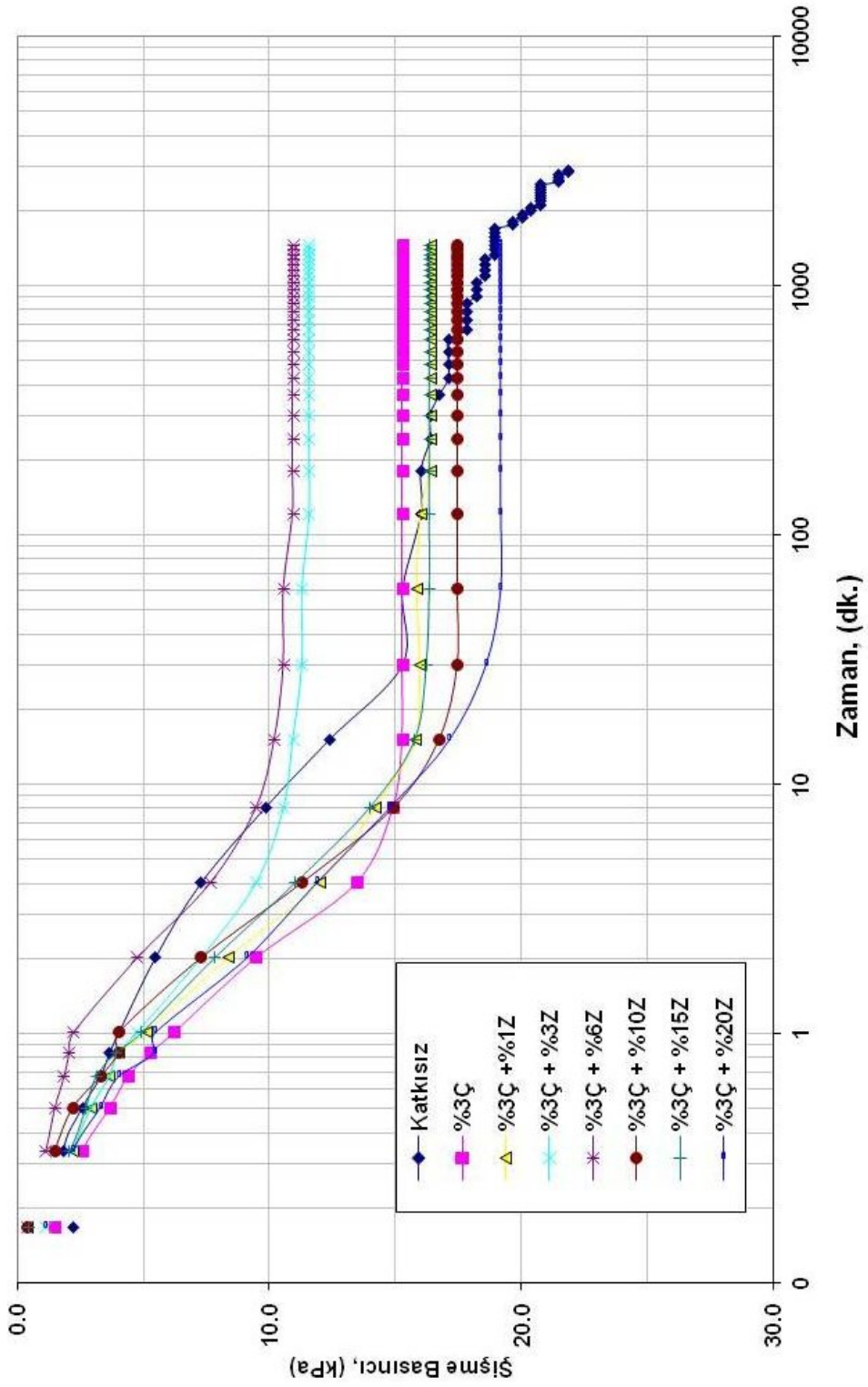




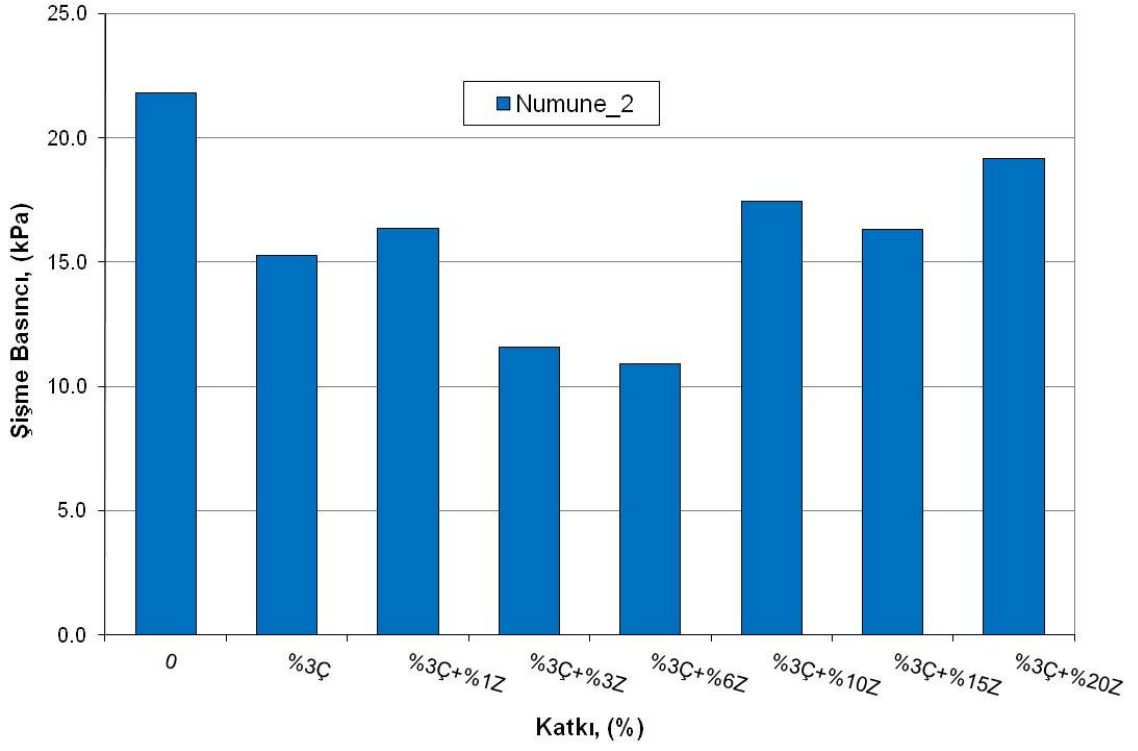
Şekil 6.10. Numune 1'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi

Çizelge 6.5. Numune 1'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları

| Katkı Oranı (%) | Şişme Basıncı (kPa) |
|-----------------|---------------------|
| Katkısız        | 47,66               |
| %3Ç             | 34,2                |
| %3Ç+%1Z         | 25,1                |
| %3Ç+%3Z         | 18,55               |
| %3Ç+%6Z         | 16,73               |
| %3Ç+%10Z        | 17,46               |
| %3Ç+%15Z        | 21,1                |
| %3Ç+%20Z        | 26,33               |



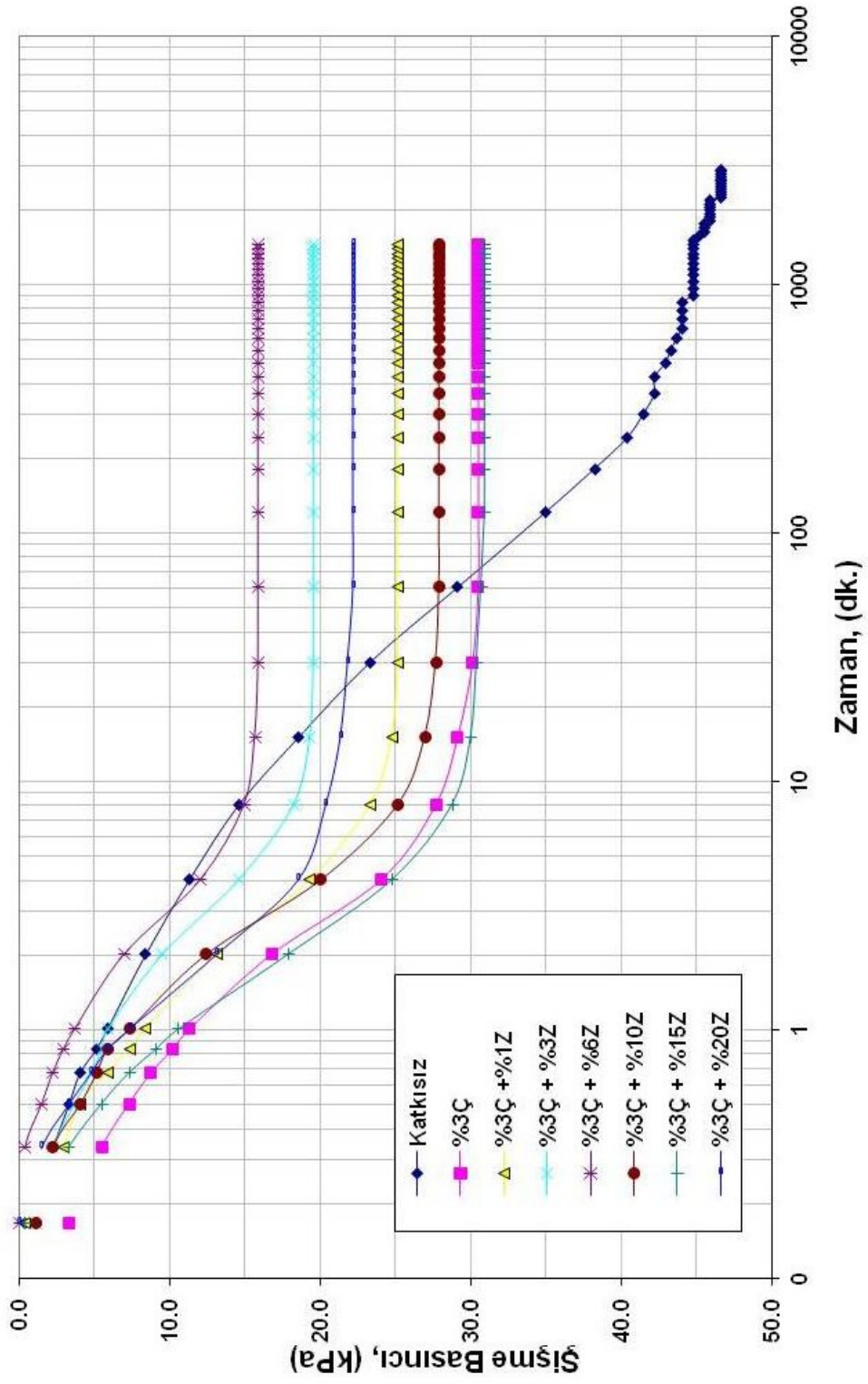
Şekil 6.11. Numune 2'ye ait şişme basıncı zaman ilişkisi



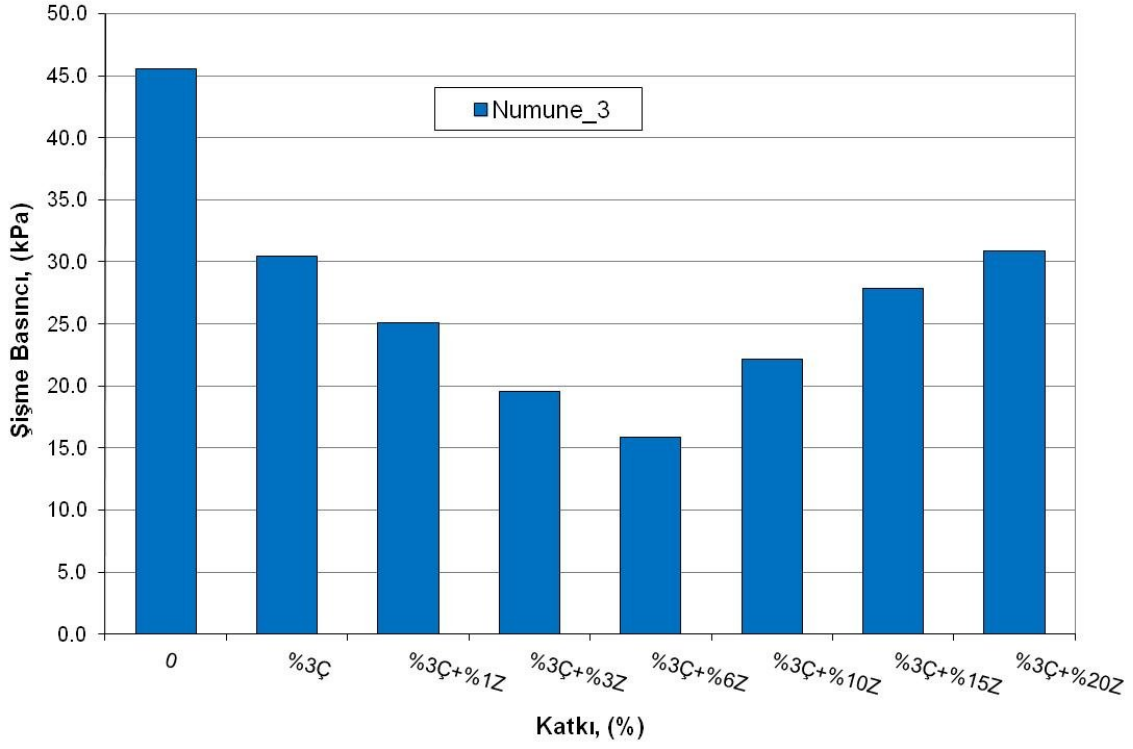
Şekil 6.12. Numune 2'ye ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi

Çizelge 6.6. Numune 2'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları

| Katkı Oranı (%) | Şişme Basıncı (kPa) |
|-----------------|---------------------|
| Katkısız        | 21,83               |
| %3Ç             | 15,28               |
| %3Ç+%1Z         | 16,37               |
| %3Ç+%3Z         | 11,57               |
| %3Ç+%6Z         | 10,91               |
| %3Ç+%10Z        | 17,46               |
| %3Ç+%15Z        | 16,32               |
| %3Ç+%20Z        | 19,16               |



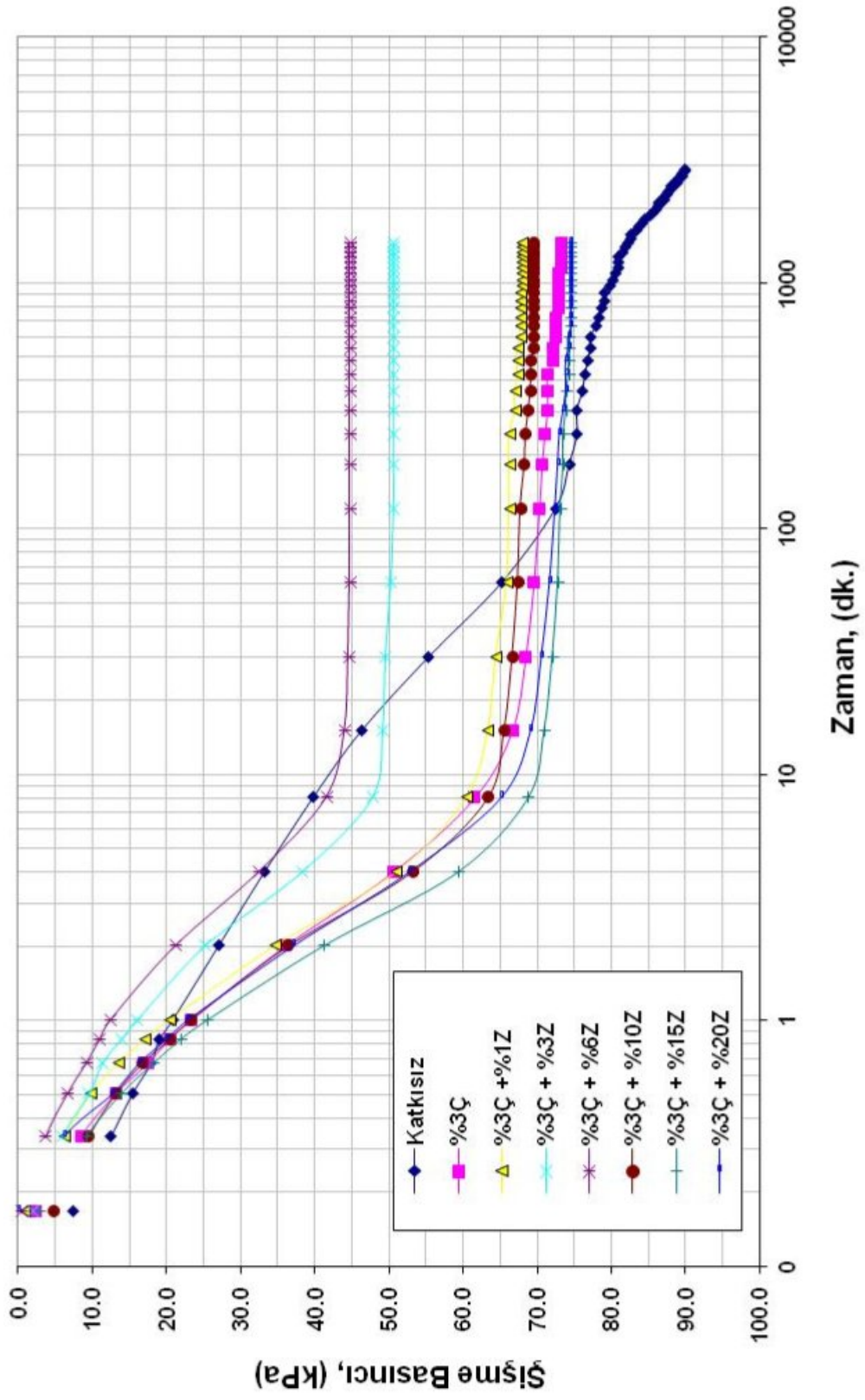
Şekil 6.13. Numune 3'e ait şişme basıncı zaman ilişkisi



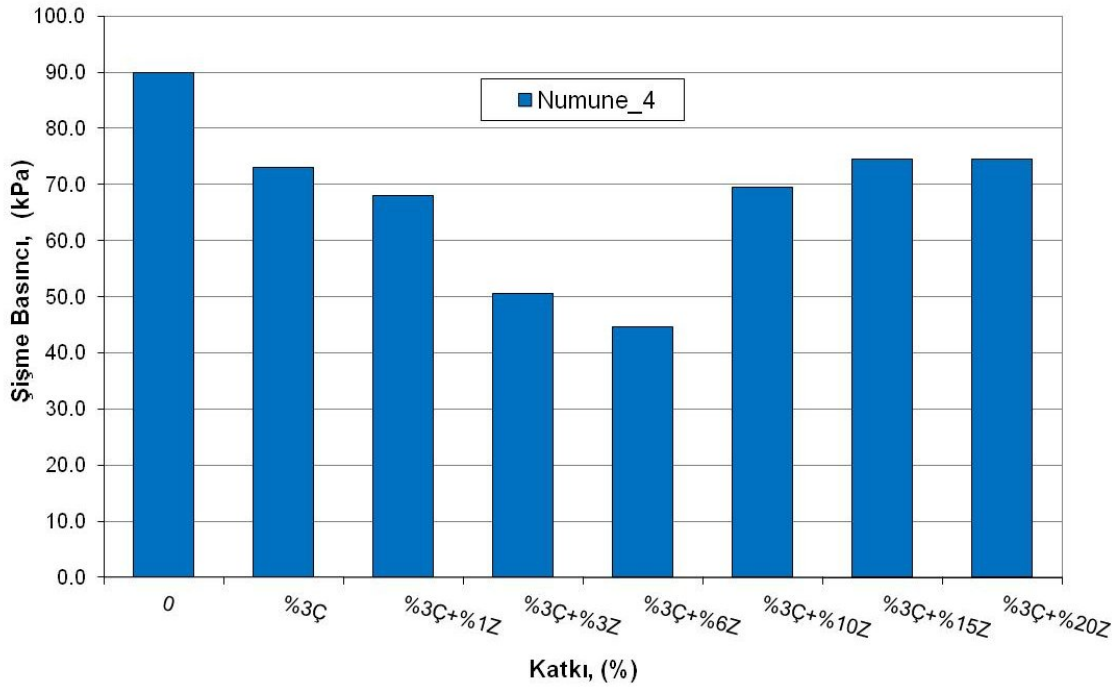
Şekil 6.14. Numune 3'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi

Çizelge 6.7. Numune 3'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları

| Katkı Oranı (%) | Şişme Basıncı (kPa) |
|-----------------|---------------------|
| Katkısız        | 45,56               |
| %3Ç             | 30,48               |
| %3Ç+%1Z         | 25,10               |
| %3Ç+%3Z         | 19,52               |
| %3Ç+%6Z         | 15,87               |
| %3Ç+%10Z        | 22,19               |
| %3Ç+%15Z        | 27,88               |
| %3Ç+%20Z        | 30,92               |



Şekil 6.15. Numune 4' e ait şişme basıncı zaman ilişkisi



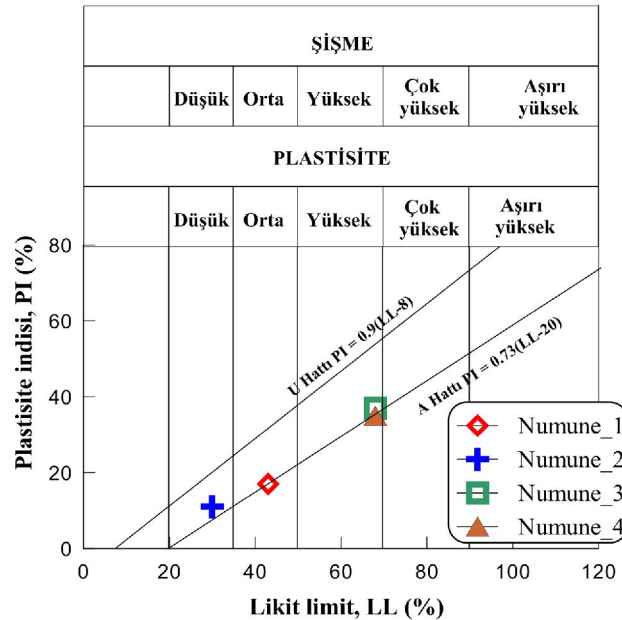
Şekil 6.16. Numune 4'e ait değişen çimento ve zeolit oranına göre şişme basıncı değişimi

Çizelge 6.8. Numune 4'e ait Şişme Basıncı Deney Sonuçları

| Katkı Oranı (%) | Şişme Basıncı (kPa) |
|-----------------|---------------------|
| Katkısız        | 89.85               |
| %3Ç             | 73.12               |
| %3Ç+%1Z         | 68.03               |
| %3Ç+%3Z         | 50.57               |
| %3Ç+%6Z         | 44.70               |
| %3Ç+%10Z        | 69.48               |
| %3Ç+%15Z        | 74.58               |
| %3Ç+%20Z        | 74.58               |

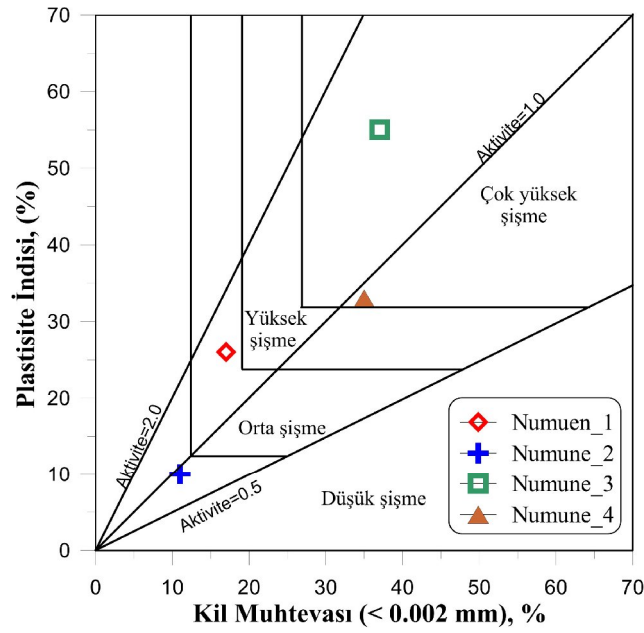
Şişme deney sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde; artan katkı yüzdesine ve numunelerin plastisite karakteristiklerine (LL ve PI) ve kimyasal özelliklerine (SAR ve ESP) bağlı olarak hem şişme yüzdesi hem de şişme basıncı değerlerinde farklı katkı yüzdelere dereceli olarak azalma meydana geldiği görülmüştür. Çimento muhtevasına oranla artan zeolit katkısı yüksek plastisiteli killerde daha belirgin bir etki gösterirken, %6-10 dan daha büyük zeolit katkı yüzdelere beklenen etki gözlemlenmemiştir. Bu durumun nedeni, zeolitin puzolan bir malzeme olması ve artan zeolit yüzdelere bağlayıcı özelliğini aktive edecek yeterince çimento olmamasıdır.

Ayrıca, şişme potansiyeli değerlendirme kartlarında (Şekil 6.17 ve Şekil 6.18) orta şişme potansiyeli gösteren numune 1, şişme deneyleri sonucunda yüksek plastisiteye sahip numune 3'ten daha fazla şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerleri vermiştir. Bu durumun, düşük plastisiteli numune 1'in yüksek plastisiteli numune 3'e oranla sahip olduğu yüksek değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) ve düşük sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.17. Numunelerin Dönüştürülmüş Plastisite Kartındaki Yerleri (Daksanamurty and Raman, 1973)





Şekil 6.18. Şişme Potansiyeli Sınıflama Kartı (Van der Merwe, 1964)

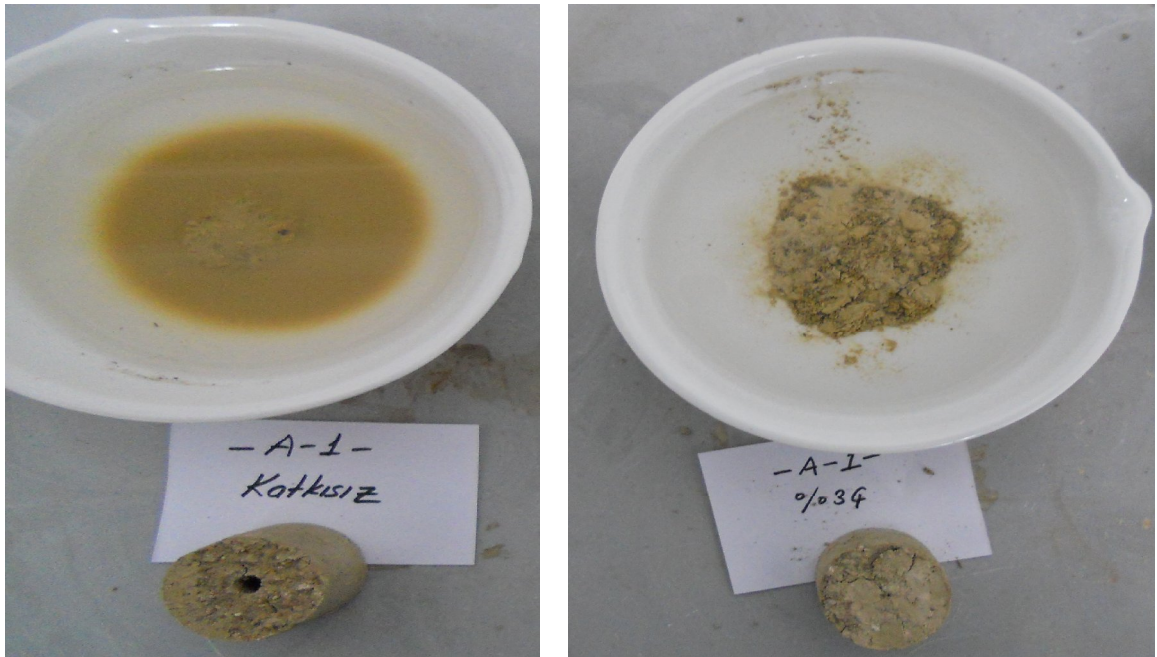
## 6.2. Dispersibilite Deney Sonuçları

Tüm fiziksel ve kimyasal deneylerde, zemin numunelerinin tabii su muhtevasında deneye tabi tutulmaları ve su muhtevasında değişiklik olmasını önlemek amacıyla izole edilmiş kaplar içinde laboratuvara getirilmeleri gereklidir. Deney öncesi numunelerin ettüde kurutulması yoluna kesinlikle gidilmemelidir çünkü ettü kurutmanın malzemenin dispersiflik durumu üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Zaman zaman farklı deneyler arasında, verdikleri sonuçlar açısından bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Bu durumda önüne gelen laboratuvar sonuçlarına göre karar verme durumunda olan mühendisin sıkıntı yaşamaması doğal olmaktadır. Halen bazı araştırmacılar tarafından dispersiflik durumunun tayini açısından hangi deneylerin daha güvenilir olduğu ve bunların bir arada değerlendirilmesi sırasında nasıl bir yol izlenebileceği hususunda çalışmalar sürdürülmektedir. Gerek ülkemizde gerek diğer ülkelerde yaygın uygulama, numune üzerinde tüm dispersiflik deneylerini yaptırmak ve bunları bir arada değerlendirirken ihtiyatlı olmak şeklindedir.

### 6.2.1. Dağılma Deney Sonuçları

Dağılma deney sonuçlarının bir kısmı şekil 6.19, 6.20, 6.21 ve 6.22’de, numune 1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla toplu olarak verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde numune 1 için; katkı malzemesi olarak kullanılan çimento ve zeolitin zeminin dispersibilite davranışını olumlu yönde etkilediği açık olarak görülmektedir. Hatta sadece çimento katkısının zemini iyileştirmeye yeterli olduğu gözlenmiştir. Katkısız zemin numunesinin etrafını koloidal bir bulutlanma kaplamışken, %3 çimento ilavesiyle beraber bu bulutlanma azalma göstermiştir. Bu da zeminin dispersif davranışının azaldığını göstermektedir (Şekil 6.19).

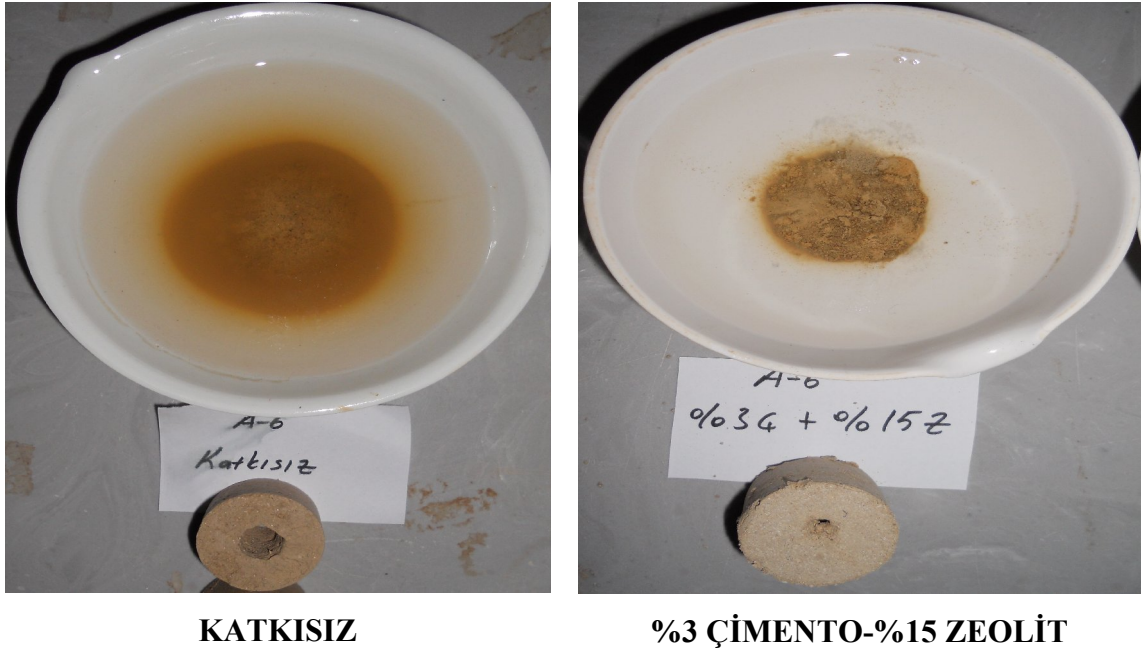
Numune 2 için; katkı malzemesi olarak kullanılan çimento ve zeolitin zeminin dispersibilite davranışını olumlu yönde etkilediği açık olarak görülmektedir. Katkısız zemin numunesinin etrafını koloidal bir bulutlanma kaplamışken, artan katkı seviyesi ile beraber bu bulutlanma giderek azalım göstermiştir. Bu da zeminin dispersif davranışının azaldığını göstermektedir (Şekil 6.20).



**KATKISIZ**

**%3 ÇİMENTO**

**Şekil 6.19. Numune 1’den bir görünüm**



**Şekil 6.20. Numune 2'den bir görünüm**

Numune 3 için yapılan deneylerde katkısız zemin örneğinde bile dispersibilite özelliğine rastlanmamıştır (Şekil 6.21).

Numune 4 için; katkı malzemesi olarak kullanılan çimento ve zeolitın zeminin dispersibilite davranışını olumlu yönde etkilediği açık olarak görülmektedir. Hatta numune 1'de olduğu gibi sadece çimento katkısının zemini iyileştirmeye yeterli olduğu gözlenmiştir. Katkısız zemin numunesinin etrafını koloidal bir bulutlanma kaplamışken, %3 çimento ilavesiyle beraber bu bulutlanma azalma göstermiştir. Bu da zeminin dispersif davranışının azaldığını göstermektedir (Şekil 6.22).

Koloidal terimini açmak gerekirse; su içinde şeker ya da tuz gibi maddeler çözülerek hazırlanan gerçek bir çözelti içinde çözünen partiküller iyon ya da molekül halindedir. Diğer taraftan süspansiyon adı verilen sıvı-katı karışımındaki partiküller gözle ya da en azından ışıklı mikroskopla görülebilir. İki uç olarak kabul edilen çözelti ve süspansiyonlar arasında kalan kolloidler bir maddenin diğeri içerisinde dağılmasına verilen addır.

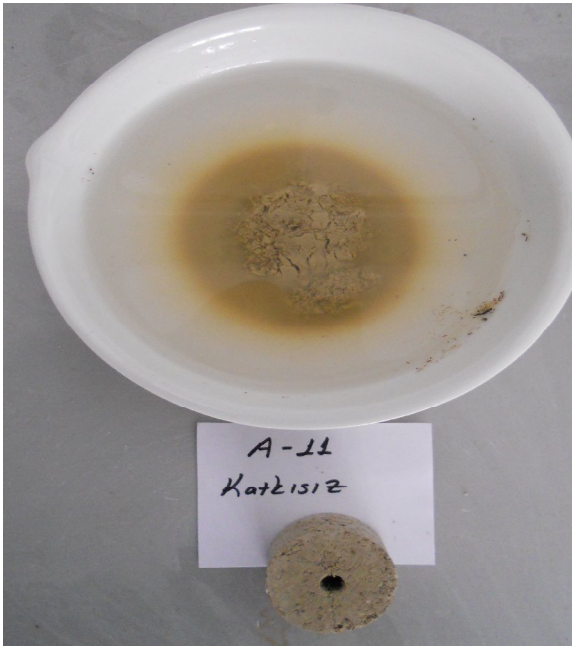


KATKISIZ



%3 ÇİMENTO-%3 ZEOLİT

Şekil 6.21. Numune 3'den bir görünüm



KATKISIZ



%3 ÇİMENTO-%1 ZEOLİT

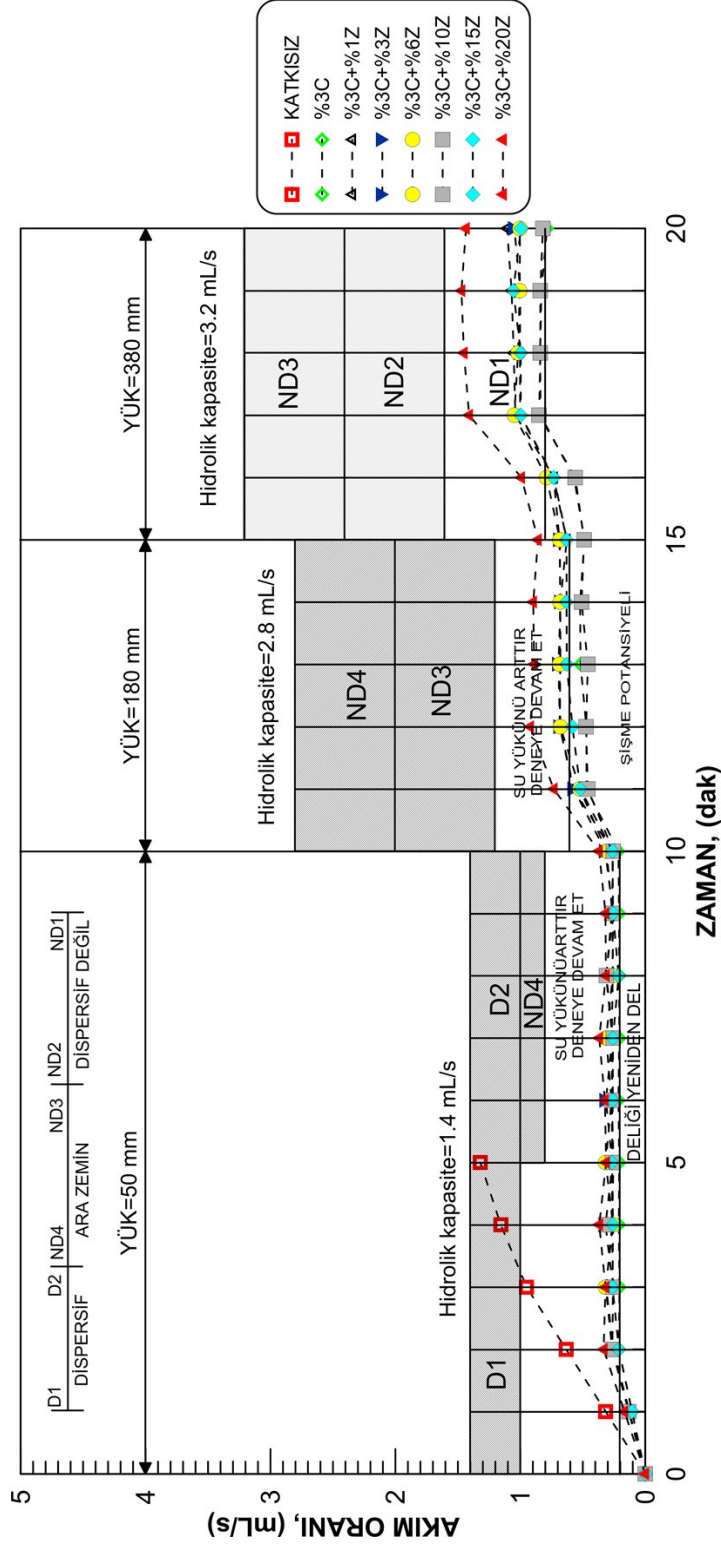
Şekil 6.22. Numune 4'den bir görünüm

### 6.2.2. İğne Deliği Deney Sonuçları

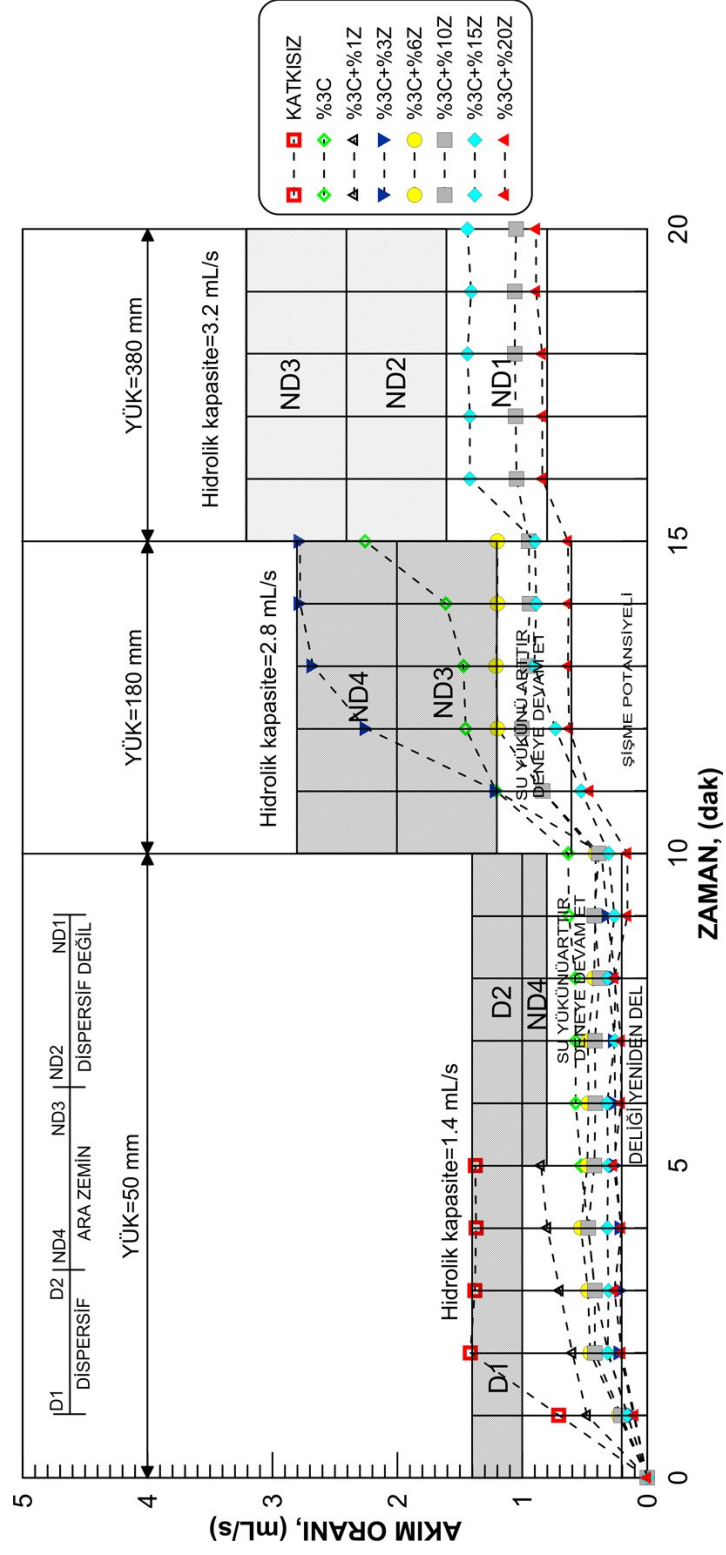
İğne deliği deney sonuçları Şekil 6.23, 6.24, 6.25 ve 6.26'da sırasıyla numune 1, 2, 3, ve 4 için verilmiştir. Deney sonuçları dikkate alındığında, numune 1 için; katkısız zemin D1 (dispersif), %3 çimento katkılı zemin, %3 çimento-%1 zeolit katkılı zemin, %3 çimento- %3 zeolit katkılı zemin, %3 çimento -%6 zeolit katkılı zemin, %3 çimento-%10 zeolit katkılı zemin, %3 çimento- %15 zeolit katkılı zemin ve %3 çimento- %20 zeolit katkılı zemin ND1(dispersif değil) sınıfına girmişlerdir. Katkısız zemine çimento ve zeolit ilavesiyle beraber dispersif olan zemin dispersif olmayan zemin özelliği kazanmıştır. Dağılma deneyi ve iğne deliği deneylerinin sonuçları birbiriyle örtüştüğü için çimento ve zeolitin dispersif özellik üzerindeki iyileştirme etkisi görülmüştür (Şekil 6.23).

Numune 2 için; katkısız zemin D1 (dispersif), %3 çimento katkılı zemin, %3 çimento-%1 zeolit katkılı zemin, %3 çimento- %3 zeolit katkılı zemin ND4 (ara zemin), %3 çimento -%6 zeolit katkılı zemin ND3 (ara zemin), %3 çimento-%10 zeolit katkılı zemin, %3 çimento- %15 zeolit katkılı zemin ve %3 çimento- %20 zeolit katkılı zemin ND1 (dispersif değil) sınıfına girmişlerdir. Katkısız zemine çimento ve zeolit ilavesiyle beraber dispersif olan zemin, sabit %3 çimento ile beraber sırasıyla %1, %3 ve %6 zeolit katkısıyla ara zemin daha sonraki katkı seviyelerin de ise dispersif olmayan zemin özelliği kazanmıştır. Dağılma deneyi ve iğne deliği deneylerinin sonuçları birbiriyle örtüştüğü için çimento ve zeolitin dispersif özellik üzerindeki iyileştirme etkisi görülmüştür (Şekil 6.24).

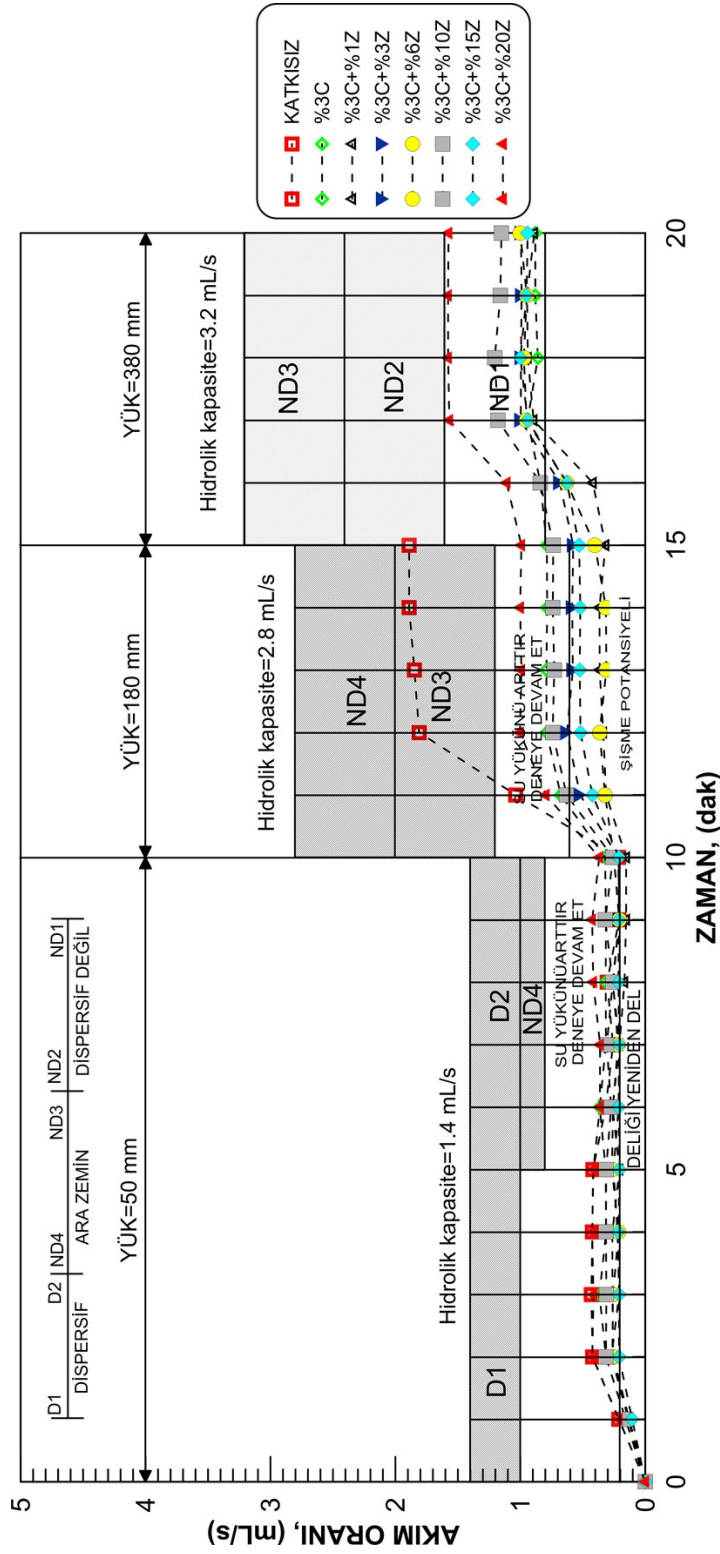




Şekil 6.23. Numune 1 iğne deliği deneyi sonuçları

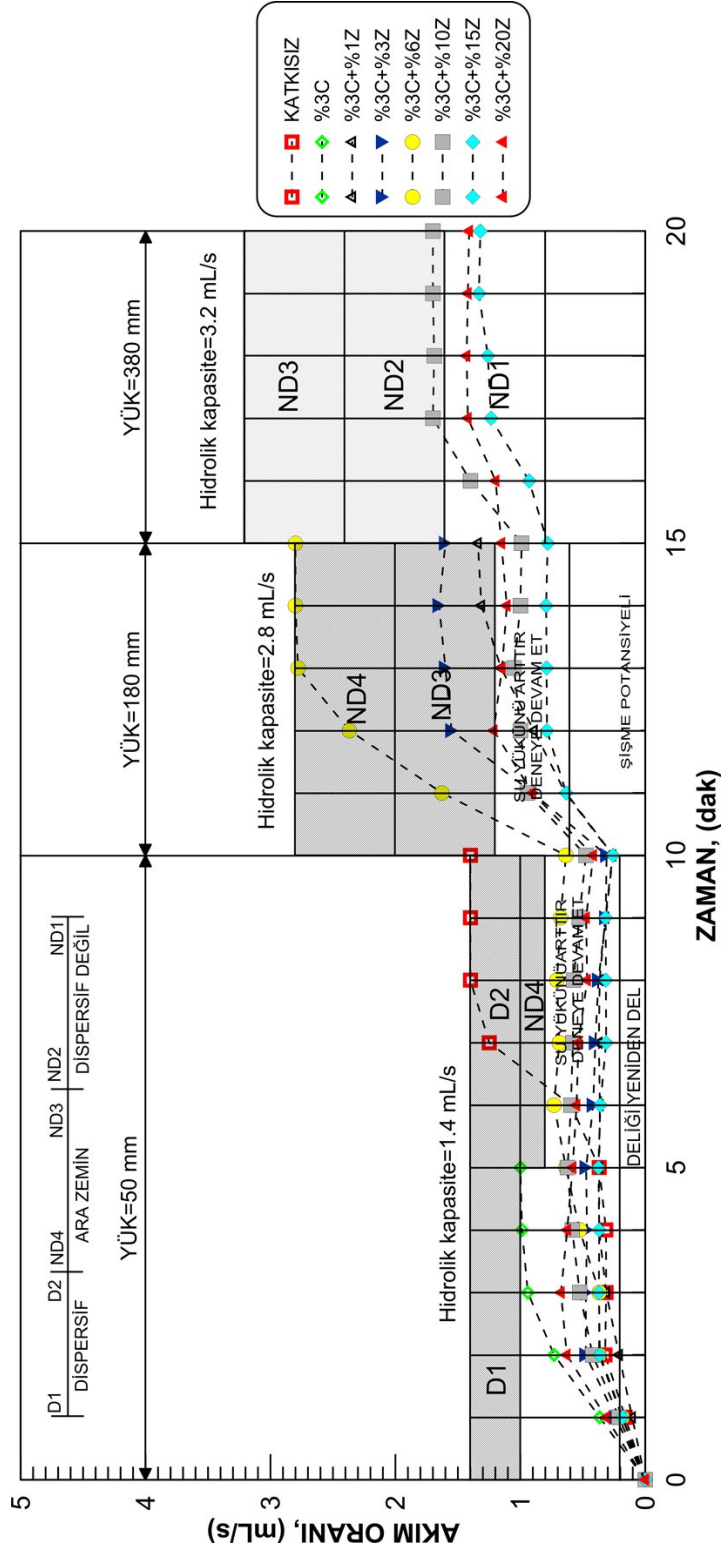


Şekil 6.24. Numune 2 iğne deliği deneyi sonuçları



Şekil 6.25. Numune 3 iğne deliği deneyi sonuçları





Şekil 6.26. Numune 4 iğne deliği deneyi sonuçları

Numune 3 için; katkısız zemin ND3 (ara zemin), %3 çimento katkılı zemin, %3 çimento-%1 zeolit katkılı zemin, %3 çimento- %3 zeolit katkılı zemin, %3 çimento -%6 zeolit katkılı zemin, %3 çimento-%10 zeolit katkılı zemin, %3 çimento- %15 zeolit katkılı zemin ve %3 çimento- %20 zeolit katkılı zemin ND1 (dispersif değil) sınıfına girmişlerdir. Katkısız zemine çimento ve zeolit ilavesiyle beraber ara zemin olan zemin, dispersif olmayan zemin özelliği kazanmıştır. Bu zeminde sadece çimentonun bile etkili olduğu gözlenmiştir. Dağılma deneyi ve iğne deliği deneylerinin sonuçları birbiriyle örtüştüğü için çimento ve zeolitin dispersif özellik üzerindeki iyileştirme etkisi görülmüştür (Şekil 6.25).

Numune 4 için; katkısız zemin ND2 (ara zemin), %3 çimento katkılı zemin ND1 (dispersif), %3 çimento-%1 zeolit katkılı zemin ve %3 çimento- %3 zeolit katkılı zemin ND3 (ara zemin), %3 çimento -%6 zeolit katkılı zemin ND4 (ara zemin), %3 çimento-%10 zeolit katkılı zemin ve %3 çimento- %15 zeolit katkılı zemin ND2 (ara zemin) ve %3 çimento- %20 zeolit katkılı zemin ND1 (dispersif değil) sınıfına girmişlerdir. Katkısız zemine çimento ve zeolit ilavesiyle beraber dispersif olan zemin, sabit %3 çimento ile beraber sırasıyla %1, %3, %6, %10 ve %15 zeolit katkısıyla ara zemin, %20 zeolit katkısıyla ise dispersif olmayan zemin özelliği kazanmıştır. Dağılma deneyi ve iğne deliği deneylerinin sonuçları birbiriyle örtüştüğü için çimento ve zeolitin dispersif özellik üzerindeki iyileştirme etkisi görülmüştür (Şekil 6.26).

Nihai olarak numunelerin dispersif özelliklerinin katkı yüzdesi ile değişimleri de Çizelge 6.9'da sunulmaktadır. Katkısız durumda numune 1, 2 ve 4 dispersif zemin, numune 3 ara zemin olarak sınıflandırılmıştır. Çizelge 6.9'dan her dört numunede de katkı miktarına bağlı olarak dispersif özelliklerinin iyileştiği görülmektedir.

Çizelge 6.9. Katkısız ve katkılı numuneler üzerinde yapılan dispersibilite deney sonuçları

| Numune No | Yapılan deney            | Katkı miktarı |     |           |           |           |            |            |            |
|-----------|--------------------------|---------------|-----|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
|           |                          | 0             | %3Ç | %3Ç + %1Z | %3Ç + %3Z | %3Ç + %6Z | %3Ç + %10Z | %3Ç + %15Z | %3Ç + %20Z |
| 1         | Dağılma deneyi sınıfı    | K4            | K1  | K1        | K1        | K1        | K1         | K1         | K1         |
|           | İğne deliği deney sınıfı | D1            | ND1 | ND1       | ND1       | ND1       | ND1        | ND1        | ND1        |
| 2         | Dağılma deneyi sınıfı    | K3            | K2  | K2        | K2        | K2        | K1         | K1         | K1         |
|           | İğne deliği deney sınıfı | D1            | ND3 | ND4       | ND4       | ND3       | ND1        | ND1        | ND1        |
| 3         | Dağılma deneyi sınıfı    | K1            | K1  | K1        | K1        | K1        | K1         | K1         | K1         |
|           | İğne deliği deney sınıfı | ND3           | ND1 | ND1       | ND1       | ND1       | ND1        | ND1        | ND1        |
| 4         | Dağılma deneyi sınıfı    | K3            | K2  | K2        | K1        | K2        | K1         | K1         | K1         |
|           | İğne deliği deney sınıfı | D2            | D2  | ND3       | ND3       | ND4       | ND2        | ND1        | ND1        |

D1 ve D2 : Dispersif, ND3 ve ND4: Ara zemin, ND1 ve ND2: Dispersif olmayan zemin  
K3 ve K4: Dispersif, K2: Ara zemin, K1: Dispersif olmaya zemin.

Numunelerin dispersibilite derecelerine bağlı olarak iyileştirme, farklı katkı yüzdelinde gerçekleşmiştir. Bu durum dispersif davranışın nedeni olarak gösterilen, numunelerin sahip olduğu farklı ESP ve SAR değerlerinin etkisi olarak değerlendirilmiştir. Dağılma deneyi ve iğne deliği deney sonuçlarının birbirlerini desteklediği ve katkı yüzdesine bağlı olarak numunelerde dispersif özelliğin iyileştiği görülmüştür (Çizelge 6.9).

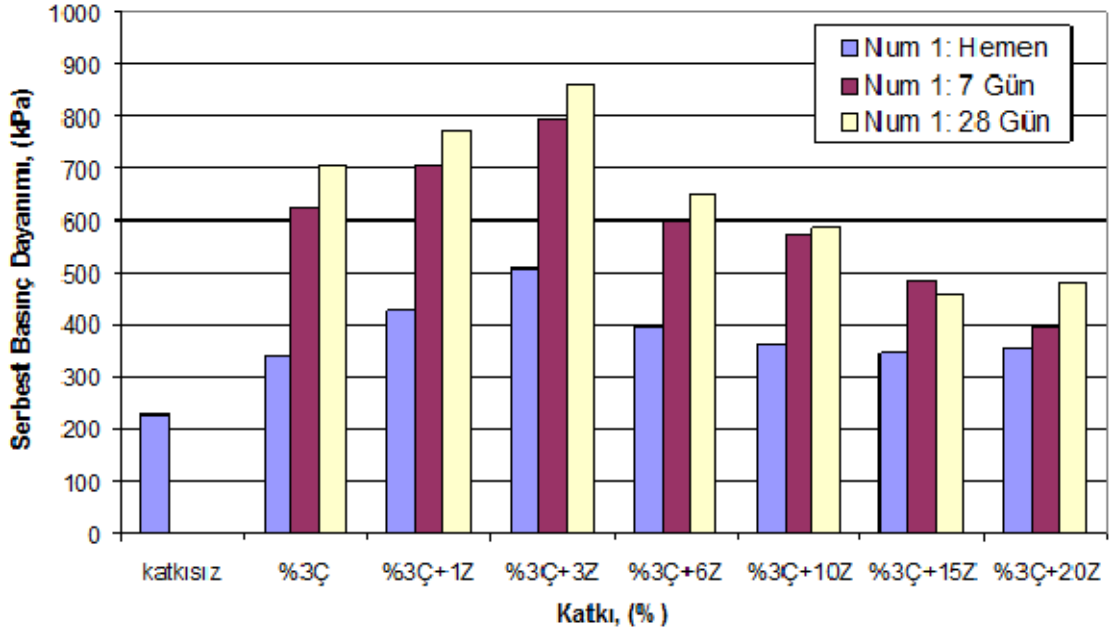
### 6.3. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Yalnızca killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemidir. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilmediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir. Eksenel yüklemeye önce zemini konsolide etmek ve eksenel yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün olmamaktadır. Bu kısıtlayıcı yönlerine karşın, serbest basınç deneyi killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemekte yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır.

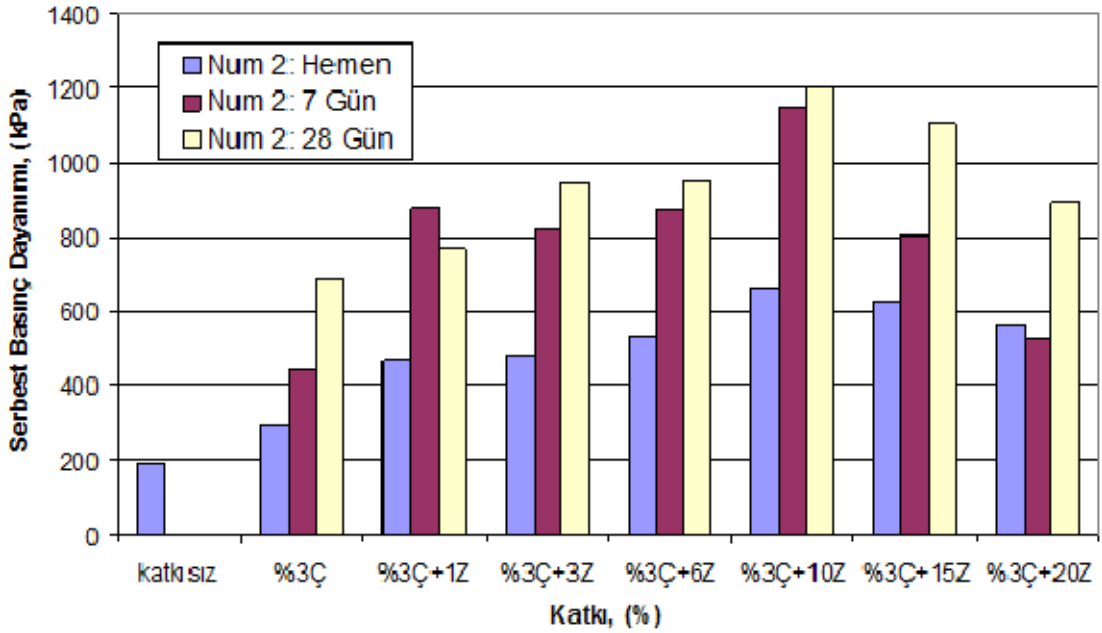
Kullanılan kil zemin üzerinde standart kompaksiyon deneyleri yapılarak kilin en iyi sıkılaşabileceği optimum su muhtevası ve bu su muhtevasındaki maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlendi. Kil zemine farklı oranlarda çimento ve zeolit karıştırarak hazırlandı ve hemen, 7gün ve 28 gün kür edildikten sonra, numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapıldı. Böylece çimento ve zeolit katkısının basınç mukavemetine etkisi, katkı oranına ve bekleme süresine göre incelendi. Şekil 6.27’de en uzaktan en yakına doğru artan kür sürelerine ve soldan sağa doğru da artan katkı oranlarına bağlı olarak numune 2 için deney sonuçlarında numunede oluşan kırılmalar görülebilmektedir. Tüm numunelerin katkı oranlarına bağlı dayanımlarındaki nihai değişimler numune1, 2, 3 ve 4 için sırasıyla Şekil 28, 29, 30 ve 31’de sunulmaktadır.



Şekil 6.27. Deney sonucunda Numune 2’den bir görünüm.



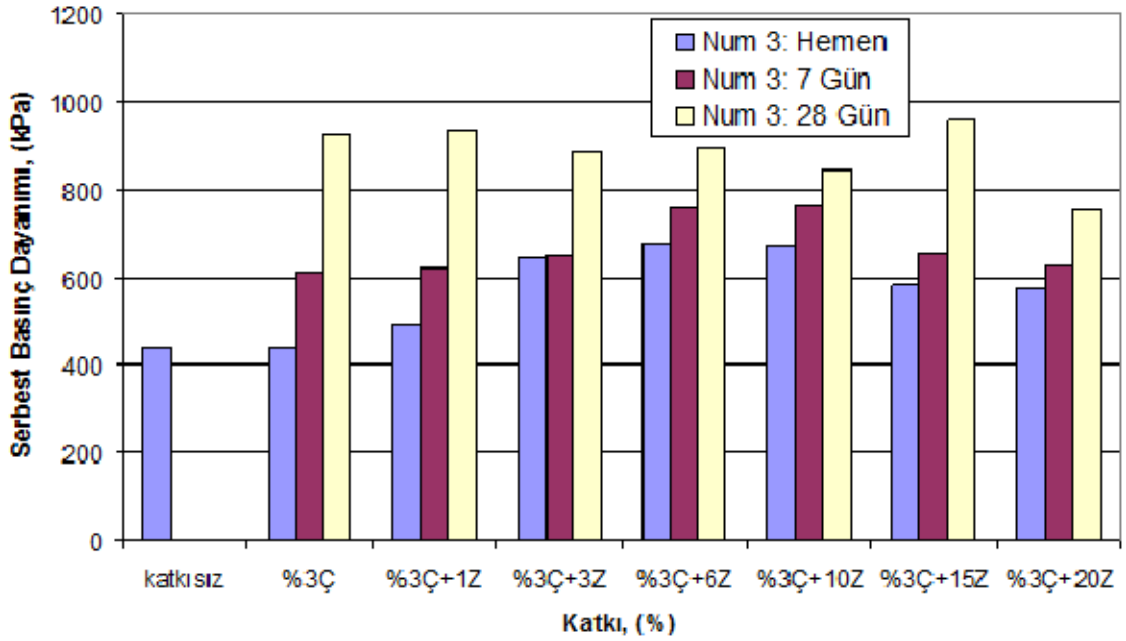
Şekil 6.28. Numune 1 için kür süresine bağlı katkı yüzdesi serbest basınç dayanımı ilişkisi



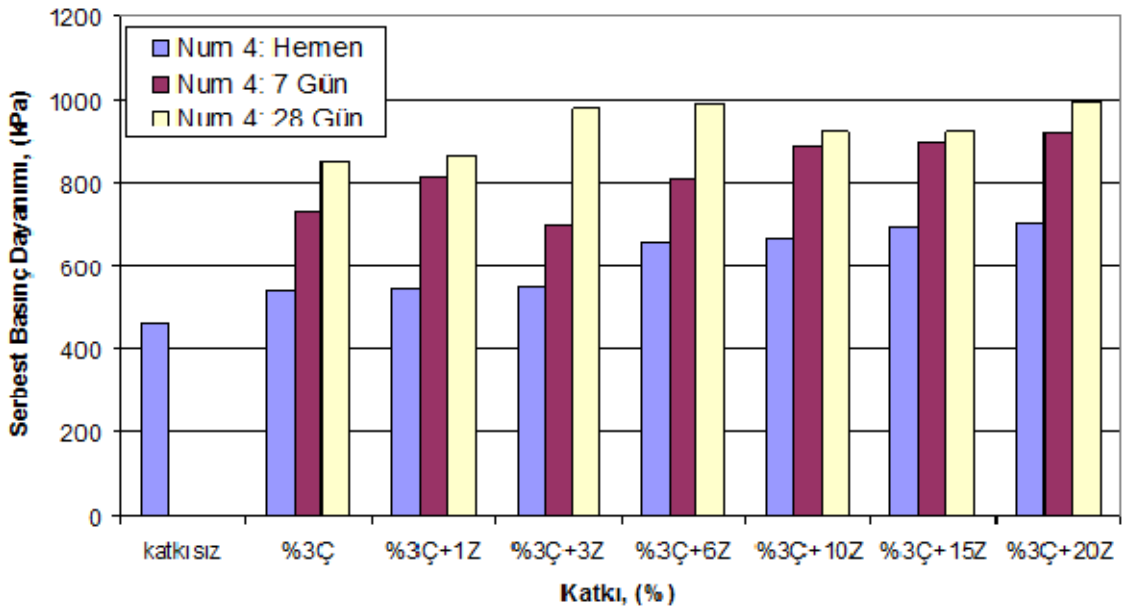
Şekil 6.29. Numune 2'ye ait serbest basınç dayanım

Deney sonuçları incelendiğinde, kür süresinin ve katkı malzemesi oranının etkisi açıkça gözükmemektedir. Düşük plastisiteli numune 1 ve 2 için dayanım değerindeki artış

7 günlük kür süresinde hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir (Şekil 6.28 ve 6.29). 28 günlük dayanım değerleri ise beklenen seviyede çıkmamıştır. Artışta bir azalım ve 7 günlük kür sonucunda ki değerlere çok yakın değerler gözlenmiştir.



Şekil 6.30. Numune 3'e ait serbest basınç dayanımı



Şekil 6.31. Numune 4'e ait serbest basınç dayanımı

Yüksek plastisiteli numuneler 3 ve 4'ün dayanım değerinde ise 7 günlük kür sonucunda çok fazla bir artış gözlenmemiştir (Şekil 6.30 ve 6.31). Asıl artış 28 günlük kür sonucunda sağlanmıştır. Artış daha yüksek seviyeye çıkmıştır. Çimento ve zeolit katkısı olarak değerlendirdiğimiz de katkısız numneye oranla nihai olarak artış gözlenirse de belirli oranlarda ki katkılardan sonra artışlarda düşüş gözlenmiştir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dispersif ve şişme özelliklerine sahip zeminlerin kuru ağırlıklarının farklı oranlarında çimento ve zeolit ilave edilerek geoteknik özelliklerindeki değişimi incelenmiştir. Bu araştırma kapsamında aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır.

- i. Bu çalışmada kullanılan zeminler hem şişme hemde dispersif özellik göstermektedir. Bu durum özellikle yüksek plastisiteye sahip dispersif zeminlerin aynı zamanda yüksek şişme potansiyeline sahip olabileceğini göstermiştir.
- ii. Katkı ilave edilen numunelerde katkı oranının artmasıyla beraber şişme yüzdesinde belirgin bir şekilde azalma ortaya çıkmıştır. Sonuçta katkı maddesi şişme yüzdesi değerinde olumlu etki yaratmıştır.
- iii. Şişme basıncında da şişme yüzdesine benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Artan katkı oranıyla beraber iyileşme devam etmekte ancak oran azalımı göstermektedir.
- iv. Artan katkı miktarına bağlı olarak katkısız duruma oranla hem şişme yüzdesi hem de şişme basıncı değerleri tüm numunelerde daha kısa bir zaman diliminde gerçekleşmiştir.
- v. Belirli bir çimento, zeolit katkı yüzdesinden sonra artan zeolit yüzdelere bağlı olarak, düşük plastisiteli numunelerde şişme basıncı ve yüzdesi değerlerinde bir artış gözlenmemiştir. Bunun nedeni olarak; yeterince çimento ile reaksiyona giremeyen serbest zeolit varlığı olarak değerlendirilmiştir.
- vi. Şişme deneyleri sonucunda; çimento ve zeolit zeminin şişme özelliklerini azaltıcı yönde etki yaptığı belirlenmiştir. Topaklanan tane



boyutunun artmasıyla toplam yüzey alanı ve bunun sonucunda absorbe edilen su miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla şişme potansiyeli azalmaktadır. Ayrıca, kil yüzeylerindeki katyonlar ile boşluk suyunda bulunan katyonlar arasında katyon değişimi meydana gelmektedir. Bu durum levhalar arasına su girişini engelleyerek, şişme yeteneğinin azalmasına neden olmaktadır

- vii. 1, 2 ve 4 nolu zeminin katkısız durumda yüksek oranda dispersif özellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Yapılan iğne deliği ve dağılma deneyleri birbiriyle uyumluluk gösteren sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Her iki deneyde de dispersif zemin, ara zemin ve dispersif olmayan zemin sınıflandırılmaları aynı katkı seviyelerinde aynı sonuçları vermiştir. Çimento ve zeolit katkısı zeminin dispersif davranışını olumlu yönde etkilemektedir.
- viii. Farklı katkı seviyelerinde ve farklı kür sürelerinde (hemen, 7 ve 28 günlük) yapılan serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde; belli katkı oranına kadar dayanımın arttığı, artan katkı oranlarında ise dayanımda beklenen artış gözlemlenmemiştir. Dayanımı etkileyen bir diğer etken ise kür süresidir. Kür süresi arttıkça dayanımda da artış gözlenmiştir. Ancak numune 1 ve 2 için 7 günlük kürde hızlı bir artış gözlenirken, numune 3 ve 4 için ise asıl artış 28 günlük kürde gerçekleşmiştir.

Çalışma sonucunda dört farklı plastisite karakteristiğine sahip dispersif ve şişme özelliği gösteren kil zemin numunelerinin plastisite karakteristiklerine, SAR ve ESP değerlerine bağlı olarak çimento ve zeolit katkıları karışımları ile bu özelliklerinin etkin bir şekilde iyileştirilebileceği görülmüştür. Dispersif ve şişme özelliğine sahip zeminlerde benzer mekanizmalarının etkili olduğunu ve nihai olarak iyileştirmede benzer katkıların kullanılabileceğini doğrulamaktadır. Aynı zamanda kullanılan bu katkıların zemin numunelerinin dayanımını da olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Abdullah, W.S., Alshibli, K.A., and Al-Zou'bi, M.S. 1999, "Influence of Pore Water Chemistry on the Swelling Behavior of Compacted Clays", *Applied Clay Science*, Vol 15, 447-462.
- Abdullah W.S., Alshargi A.S., 2011 Rehabilitation of Medium Expansive Soil Using Cement Treatment, *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 25, No 3.
- Acciardi, R.G., 1985, "Pinhole Test Equipment Design and Test Result Evaluation", United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, REC- ERC-85-3.
- Addo, J.Q., T.G. Sanders, and M. Chenard. 2004. Road Dust Suppression: Effect on Maintenance Stability, Safety, and the Environment Phases 1–3.
- Alkaya D., 1996, Denizli Şehrinde Killi Zeminlerin Taşıma Gücünün Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Al-Rawas, A.A., Hagoa, A.W. and Al-Sarmib, H. 2005, "Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman", *Building and Environment*, Vol 40, 681-687.
- Al-Zoubi M.S., 2008, Undrained Shear Strength and Swelling Characteristics of Cement Treated Soil, *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 2, No 1.
- Angın Z., 2005, Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi.
- ASTM D 4647-1993, "Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer" American Society for Testing and Materials, V.04.08.

- ASTM D 4221-1990, "Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test", American Society for Testing and Materials, V.04.08.
- ASTM, 1994, "Annual Book of ASTM Standards. Soil and Rock", Vol. 0 4.08. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Atkinson, J.H., Charles, J.A. and Mhach, H.K., 1990, Examination of Erosion Resistance of Clays in Embankment Dams, Quarterly Journal of Engineering Geology, V.23, p.103-108.
- Aydın M. C., Aydın S., 200649–54, Dispersif Killerin Dolgu Baraj Yapımı Açısından Önemi, Kibited 1(1).
- Basma, A.A., Al-Hamoud, A.S., and Husein, A. 1995, "Laboratory Assessment of Swelling Pressure of Expansive Soils", Applied Clay Science, Vol 9, 355-365.
- Bell, F.G. 1996, "Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils", Engineering Geology, Vol 42, 223 – 237.
- Bhuvaneshwari, S., Soundra, B., Robinson, R.G., ve Gandhi, S.R. 2007, "Stabilization and Microstructural Modification of Dispersive Clayey Soils", First International Conference on Soil and Rock Engineering, Columbo, Srilanka, August 5-11.
- Bilim C., 2011, Çimento Malzemesinde İkame Malzemesi Olarak Zeolit ve Silis Dumanı Kullanımı, Erciyes Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27(4), Syf 339-345.
- Brand E.W. and Brenner R.P., 1981, Soft Clay Engineering, Elsevier Scientific Publishing Co, New York.

- Caggiano, M. F. and Bentley, M. 1998, Route 130 Bridge Snowfree İnstallation Electrical Analysis and Recommendations- final Report, FHWA 1998 – 008, pp. 11.
- Chen, F. H. 1981. Foundations on Expansive Soils. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Chen, F.H., 1988, “Foundation on Expansive Soils”, American Elsevier Science Publication, New York.
- Craig R.F., 1990, Soil Mechanics, Chapman and Hall, Fourth, Adition, London.
- Coduto, P., 2006, (Çev. Mollamahmutoğlu, M.) Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, s: 39-80.
- Culloty, S.C. and Mukahy, M.F. 1992. An Evaluation of Anaesthetics for Ostrea Edulis (L.). Aquaculture. 107, 249-252.
- Çetin M., 2003, Değişik Çevresel Koşullar Altında, Şişen Zeminlerin Özelliklerinin Belirlenmesi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Çokça, E. 2001, “Use of Clay C Fly Ashes for the Stabilization of An Expansive Soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 127(7), 568-573.
- Daksanamurty, V., and Raman, V. 1973, “A Simple Method of Identifying an Expansive Soil”, Soils and Foundation, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 13(1):97-104.
- Das B.M., 1983, Advanced Soil Mechanics, İnternational Edition, Me Graw-Hill Book Co.

- Demir S., Kılıç M., 2010, Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri, GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi, 27(1), 95-104.
- Du, Y., Li, S., and Hayashi, S. 1999, "Swell –Shrinkage Properties and Soil Improvement of Compacted Expansive Soil, Ning-Liang Highway, China", Engineering Geology, Vol 53, 351-358.
- Erdem N.P., 1982, Mühendislik Jeolojisi, Yıldız Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Erguvanlı K., 1994, Mühendislik Jeolojisi, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- E.R. Tuncer, 1995, "Toprak Dolgu Barajlarda İçsel Erozyon" Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri, DSİ Genel Müdürlüğü, Adana, ss.27-15.
- Environment Canada's Road Salts Web Site Reports, "Success In Road Salts Management", ([www.ec.gc.ca/nopp/roadsalt/success/en/index.cfm](http://www.ec.gc.ca/nopp/roadsalt/success/en/index.cfm)).
- Federal Highway Administration Office of Highway Information Management, 1996.
- Fell, R., Macgregor, P. and Stapledon, D., 1992, Geotechnical Engineering of Embankment Dams, Balkema, Rotterdam, 675p.
- Feng, Tao-Wei. 2002, "Effect of Small Cement Content on Consolidation Behavior of a Lacustrine Clay", ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol 25 (1), 53-60.
- Food Standard Agency. "Current EU Approved Additives and Their E Numbers". <http://www.food.gov.uk/safereating/chemsafe/additivesbranch/enumberlist>. Retrieved 22 March 2010.
- Frydman, I. R. and Ehrenreich, T., 1977, Stabilization of Heavy Clay With Potassium Chloride. Journal of Geotechnical Engineering, 8, 95-107.

- Genç, S., 1987, Mineraller-Kayaçlar, Jeolojik Yapılar ve Saha Jeolojisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basın Evi, 221, Trabzon
- Göksan TS., 1999, Killi Zeminlerde Emme Kapasitesi ve Şişme Basıncı İlişkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Grim, R. E., 1959, Physiochemical Properties of Soils, Clay Minerals, J.Aoil Mech. Found. Div., ASCE, vol. 85,no.SM2 Suppressants: Avoiding Another Times Beach: An Expert Panel Summary, Las Vegas, NV, May 30–31, 2002. 79 pp.
- Harichane K., Ghrici M., Kenai S. and Grine K., 2011, Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils, Geotech Geol. Eng.
- Hışmanoğlu E., 2006, Şanlıurfa Germuş (DağEteği) Yöresi Killerinin Özellikleri ve Şişme Potansiyelinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Holleman, A.F. and Wiberg, E., 2001, "Inorganic Chemistry" Academic Press: San Diego, ISBN 0-12-352651-5.
- Işıldar A.A., 1997, Toprağa Zeolit İlavesinin Nitrifikasyon Üzerine Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü, Isparta.
- İnalgaç G.M., 2011, Zemin Parametrelerinin Deneysel ve Teorik Olarak İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Jonathan Q. Addo, 2004, PE Thomas G. Sanders, Ph.D., PE Melanie Chenard, E.I.T., Road Dust Suppression: Effect on Maintenance Stability, Safety and the Environment Phases 1-3.
- Jonathan Q. Addo, Sanders, T. G., Chenard, M. 2004, Road dust suppression : Effect on unpaved Road Stabilization.

- Jumieis A.R., 1984, Soil Mechanics Robert E. Krieger Co. Malabar, Florida.
- Keren, R. and I. Shainberg. 1975, Water Vapor Isotherms and Heat of Immersion of Na-Ca Montmorillonite systems, I. Homoionic Clay, Clays and Clay Minerals, 23, 193-200.
- Keskin, S.N., Yıldırım, H., Ansal, M.A., 1992, Killi zeminlerde yanıl şişme davranışları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İstanbul, 14-30.
- Kılınçarslan Ş., 2007, Zeolit İçeren Betonların Termomekanik Özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11-3.
- Knodel, P.C., 1991, Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Materials Engineering Branch, Denver, USA, R91-09, p.17.
- Komine, H., Ogata, N., 1994, Experimental Study on Swelling Characteristics of Compacted Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 31, 478-490.
- Komine, H., Ogata, N., 1996, Prediction for Swelling Characteristics of Compacted Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, 33, 11-22.
- Lambe, T.W., 1960, "The Character and Identification of Expansive Soils. Soil PVC Meter", Federal Housing Administration, Technical Studies Program, FHA 701.
- Lambe T.W. and Whitman R.V., 1979, Soil Mechanics, SI Version John Wiley and Sons, Singapore.
- Lee, H., Cody, R. D., Cody, A. M. and Spry P.G., 2000, Effects of Various Deicing Chemicals on Pavement Concrete Deterioration, Mid-Continent Transportation Symposium Proceedings, pp. 151-155.

- Leggett, T.S., 1999, "Temperature and Humidity Effects On The Co-efficient Of Friction Value After Application Of Liquid Anti-icing Chemicals", Final Report, Forensic Dynamics Inc., Kamloops.
- Lewis, D.A. and Schmit, N.O., 1977, Erosion of Unsaturated Clay in Pinhole Test, ASTM STP 623, p.260-273.
- Low, P.F., 1992, Interparticle Forces in Clay Suspensions: Flocculation, Viscous Flow and Swelling, Proceedings of the 1989 Clay Minerals Society Workshop on the Rheology of Clay/Water Systems.
- McBride, M.B. 1989, Surface Chemistry of Soil Minerals, Minerals in Soil Environments, 2nd ed, Soil Sci. Soc. Am. Book Ser, No. 1, Madison, WI. 35-88.
- Mc Kenzie, D. C., 1998, Soilpak-cotton Growers, NSW Department of Primary Industries, State of New South Wales, V. E3-E4, Australia.
- Mesri, G., and Olson, R.E., 1971. Mechanisms Controlling the Permeability of Clays, Clays and Clay Minerals, 19, 151 - 158.
- Mertens G., Snellings R., Van Balen K., Bicer-Simsir B., Verlooy P. and Elsen J., 2009, Pozzolanic Reactions of Common Natural Zeolites with Lime and Parameters Affecting Their Reactivity, Cement and Concrete Research, 233–240.
- Mitchell, J.K., 1976, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Mowafy, Y.M., Bauer, G.E., 1985, Prediction of Swelling Pressure and Factors Affecting the Swell Behavior of an Expansive Soil, Transportation Research Record, 1032, 23-28.



- Murty, V.R., ve Praveen, G.V., 2008, "Use of Chemically Stabilized Soil as Cushion Material Below Light Weight Structures Founded on Expansive Soils", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 20 (5), 392-400.
- Nelson, J.D and Debra, 1992, Expansive Soils-problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, J. Willey and Sons, New York, p259.
- NRC., 1983, "Safety of Existing Dams, Evaluation and Improvement", National Research Council, National Academy Press.
- O'Neil M. W. and Poormoayed, N., 1980 Methodology for Foundations on Expansive, Clays., Journal of Geotechnical Engineering, Division, American Society of Civil Engineers Vol. 106, No. GT12, p. 1345-1367.
- Ouhadi, V.R. and Goodarzi, A.R., 2006, Assessment of The Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum, Engineering Geology, V.85, p.91-101.
- Önalp A, 1983, İnşaat Mühendisleri Geoteknik Bilgisi; cilt 1,2 KTÜ yayını, Trabzon.
- Özaydın, K., 1989, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Önalp, A., 2007, "Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği", İstanbul.
- Özpınar Y. Ve Kılıç D., 1995, Denizli İli Çevresindeki Alüvyoner Agregalarda Kil Minerallerinin Beton Dayanımına Etkileri, 7. Ulusal Kil Sempozyumu, Eylül, Ankara, Bildiriler Kitabı, Syf. 341-350.
- Özpınar Y., Kumsar H., Gökgöz A., Denizli-Kaklık Çevresindeki Kil Oluşumlarının Denizli Çimento Fabrikasında Ham Madde Olarak Kullanılabildiğinin İncelenmesi 7.Ulusal Kil Sempozyumu, Eylül, 1995, Ankara, Bildiriler Kitabı, Syf 371-383.

- P.C. Knodel, 1991, "Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils", Bureau of Reclamation, Materials Engineering Branch, R-91-09,17p.
- Piechota, T., J. van Ea, J. Batista, K. Stave, and D. James (Eds.). 2004, United States Environmental Protection Agency. EPA 600/R-04/031. Potential Environmental Impacts of Dust.
- Rahn H.P., 1986, Engineering Geology An Environmental Approach, Elsevier Science Publishing Company Inc, New York.
- R. D.; Bales, S. E.; Hudnall, P. M.; Burns, T. P.; Poindexter, G S., 1988, "Highly Reactive Magnesium for the Preparation of Grignard Reagents: 1-Norbornane Acid" Organic Syntheses, Collected Volume 6, p.845.
- Reyier, J.W., 1972, A Comparison Between Calcium Chloride and Magnesium Chloride as Dust-Binding Agents on Gravel Roads. Royal Institute of Technology. Tack 70 S-10044, Stockholm, Sweden.
- Resendiz, D., 1977, Relevance of Atterberg Limits in Evaluating Piping and Breaching Potential, ASTM STP 623, p.341-353.
- Ryker, N.L., 1977, Encountering Dispersive Clays on Soil Conservation Service Projects in Oklohoma, ASTM STP 625, p.370-389.
- Sarıkaya H., 2006, Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Savaş, H., 2000, Toprak Dolgu Barajlarda Kullanılan Yüksek Plastisiteli Killerin Dispersibilite Özelliğinin Belirlenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi.

- Savaş, H., 2008, Dolgu Barajlar İçin Dispersif Killerin Tanımlanmasında Kullanılan İğne Deliği Deneyindeki Gelişmeler ve Karşılaştırmalı Analizi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalında Doktora Tezi.
- Savaş H. , Tosun H., 2009, Dispersif Killerinin Tanımlanması için Kullanılan İğne Deliği Deneyinin Geliştirilmesi ve Karşılaştırılmalı Analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı:2.
- Sherard, J.L., Decker, R.S. and Ryker, N.L., 1972, Piping in Earth Dams of Dispersive Clay, Proceeding Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, V.1, p.589-626.
- Shuai, F. 1996, Simulation of Swelling Pressure Measurements on Expansive Soils, Ph.D. Disertation, University of Saskatchewan, Canada.
- Sposito, G., Prost, R., 1982, Structure of Water Adsorbed on Smectites, Chem. Rev. 82, 553–573.
- Sridharan, A., Rao, A. S., Sivapullaiah, P. V., 1986, Swelling Pressure of Clays, Geotechnical Testing Journal, 9 (1), 24-33.
- Sridharan, A., Choudhury, D., 2002, Swelling Pressure of Sodium Montmorillonites, Geotechnique, 52 (6), 459-462.
- Sridharan A., Rao A., and SivapuUaiah, P.V., 1986, Swelling Pressure of Clays, Geotechnical Testing Journal, American. Society for Testing and Materials, Vol. 9 No. I, p. 24-33.

- Sridharan A. and Gurtug Y., 2004, Swelling behaviour of compacted fine-grained soils, *Engineering Geology* 9 –18.
- Sherard, J.L., Richard, J.W., Gienski, S.F. and William, A.C. 1963, “Earth-rock Dams, Engineering Problems of Design and Construction”, John Wiley and Sons, A.B.D.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Decker, R.S., 1976, Identification and nature of dispersive soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol:102, n.GT2, p.287-301.
- Stapledon, D.H. and Casinader, R.J., 1972, Dispersive soils at Sugarloaf Dam Site, near Melbourne, Australia, *ASTM STP 623*, p.432-466.
- Şahin M., 2004, Dispersif Killerle Projelendirmeye Bir Örnek Koyunbaba Barajı, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 430.
- Taban S. ve Şimşek O., 2009, Zeolitik Tüf Katkı Oranı ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 24, No 1, 145-153.
- Tamadher T. Abood, Anuar Bin Kasa and Zamrı Bin Chık, 2007, Stabilization of Silty Clay Soil Using Chloride Compounds, *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2, 102-110.
- T.W. Lambe, 1962, “Soil Stabilization” Chapter Four of *Foundation Engineering*, G.A. Leonards (ed), McGraw-Hill, New York.
- Tosun H., 1994, “Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi”, *DSİ Teknik Bülteni*, sayı:80, ss.51-60.

- Tosun, H., 1995, Importance of Dispersive Soils for Earthfill Dams an a Research on Control Tests Adopted in Turkey, Symposium on Research and Development in the Field of Dams, Crass-Montana- Switzerland, p.133-144.
- Tosun, H., 1997, Comparative Study on Physical Tests of Dispersibility of Soils Used for Earthfill Dams in Turkey, ASTM Geotechnical Testing Journal, GTSODS, Vol.20, 2, p.242-251.
- Tosun H. ve Kırmızıtaş H., 1993, "Harran Killerinin Şişme Potansiyeli ve Bölgede İnşa Edilecek Su Yapıları İçin Önemi", Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumu, 20-25, Gümüldür, Bildiri kitabı, s:313-327.
- Tosun H. ve Savaş H. 2001, Düşük Plastisiteli Zeminlerde Dispersibilite Özeliğinin Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi, Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIV, S.2.
- Tosun H., Zorluer İ., Tozluk H. ve Savaş H., 2001, "Toprak Dolgu Barajlarda Dispersif Killerin Kullanımı ve Tasarım ve Kontrol Kriterlerinin Araştırılması" TÜBİTAK Projesi, P. No: İNTAG-719.
- Tosun H., 1994, "Dolgu Barajlar Yönünden Dispersif Killer ve DSİ Çalışmaları" 5. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, 20-21, Ankara, ss. 98-110.
- Tosun H., 1994, Dispersif Killer ve Toprak Dolgu Barajlar Açısından Önemi: DSİ Teknik bülteni, sayı:80, 51-60.
- Tosun H., Savaş H. ve Bitkova, N., 2002, Dispersif ve Ara Zemin Örneklerinde Sıkıştırma Enerjisinin Zeminin Borulanma Davranışı Üzerine Etkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Eskişehir, s.34-44.

- Türköz M., Savaş H. ve Tosun H., 2011, Problemlili Kil Zeminlerin Magnezyum Klorür Solüsyonu İle İyileştirilmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 26, No 1, 233-242.
- TS 1900, “İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri” , TSE, Mart 2006. Tumluer, G 2006. Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, 89.
- Türköz M., 2006, Şişen Killerin Kireç Katkısı İle Stabilizasyonu ve Eskişehir Meşelik Killerine Uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIX, S.2.
- Tüylüce F., 2010, Deniz Killerinin Kireç Stabilizasyonu İle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- USBR 5400-89, “ Determining Dispesibility of Clayey Soils by the Crumb Test Method”, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, pp. 414-418.
- USBR 5405-89, “Determining Dispesibility of Clayey Soils by the Double Hydrometer Test Method”, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 419-424.
- USBR 5410-89, “Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Pinhole Test Method”, Earth Manual II, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, pp. 425-437.
- Uzal B., Turanlı L., Yücel H., Göncüoğlu M.C. ve Çulfaz A., 2010, Pozzolanic Activity of Clinoptilolite: A Comparative Study with Silica Fume, Fly Ash and a Non-Zeolitic Natural Pozzolan, Cement and Concrete Research 40-398–404.

- Uzer A.U. ve Olgun M., 2006, Şişen Zeminler Üzerinde İki Farklı Şişme Deney Yöntemi Sonuçlarının Değerlendirilmesi, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, Cilt 5, Sayı:3.
- Uzuner, B.A., 2000, Temel Mühendisliğine Giriş, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Van der Merwe, D.H. 1964, “The Prediction of Heave from the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction of Soils”, Civil. Eng. South Africa, 103-107.
- Venkatabor Rad, G. 1977., Physico-Chemical Mechanism Governing the Plasticity Behaviours of Soils. Journal of Indian Geotechnical. 7, 261-262.
- Van Olphen, H., 1977, An Introduction to Clay Colloid Chemistry, 2nd ed., Wiley Interscience, New York.
- Wan, C.F. and Fell, R., 2004, Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, April, p.373-379.
- Wells, A. F., 1984, Structural Inorganic Chemistry, Oxford: Clarendon Press. ISBN 0-19-855370-6.
- Woods, K.B., 1960, Highway Engineering Handbook, First Edition McGraw-Hill.
- Wooltoton, F.L.D., 1954, The Scientific Basis of Road Design. Edward Arnold Publishers Ltd. London.
- Yıldız K., Dorum A. ve Koçak Y., 2010, Pomza Zeolit ve CEM 1 Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik ve Termal Uyumunun Yüksek Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, No 24.

Yılmaz I. ve Karacan E., 1998, Zeminlerin Şişme Özellikleri, Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140 Sivas, Sayı 52.

Yılmaz, I. ve Civelekoglu., B., 2009, “Gypsum: An Additive for Stabilization of Swelling Clay Soils”, Applied Clay Science, Vol 44, 166– 172.

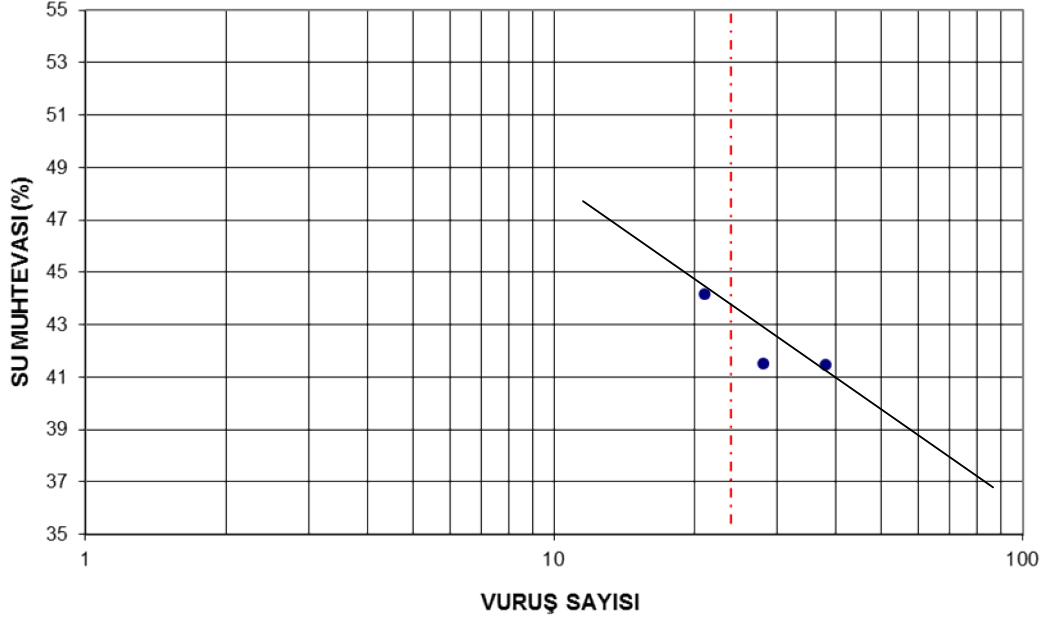
Yong and Warkentin, B.P., 1996, Introduction to Soil Behavior, Chapter 7, Macmillan, New York, p.151-175.



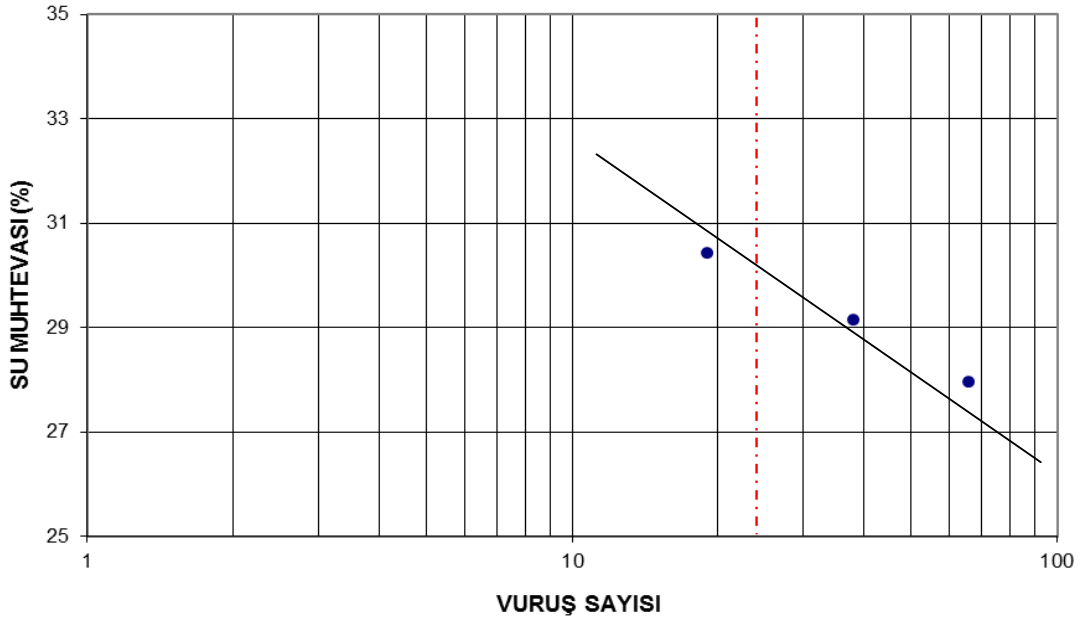
## EKLER

### Ek.1. Örneklerin Kıvam Limiti Deney Sonuçları

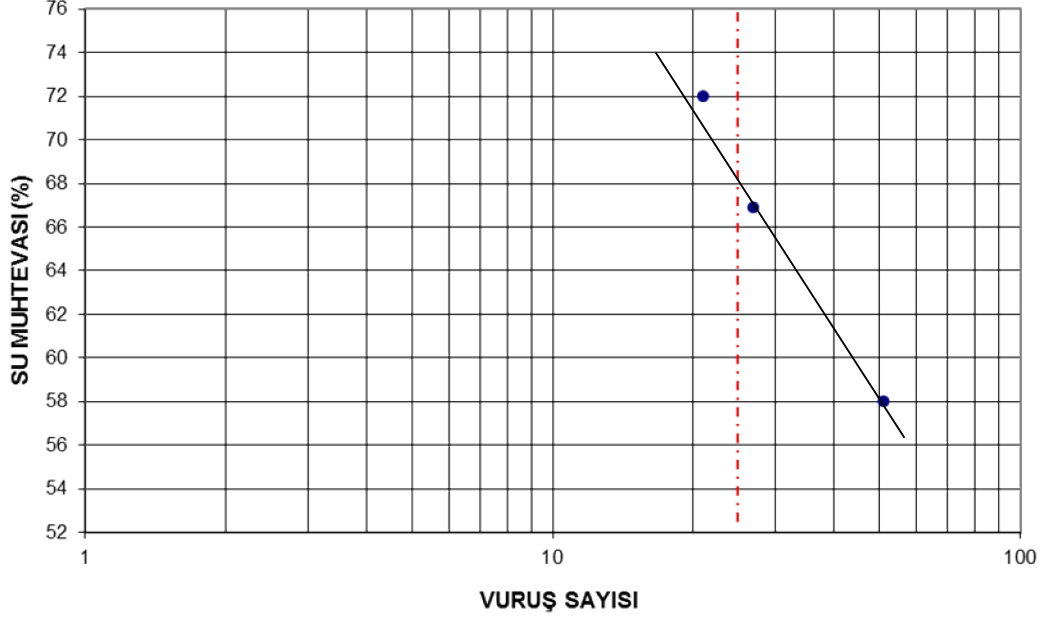
#### Ek.1.1. Numune 1 Deney Verileri



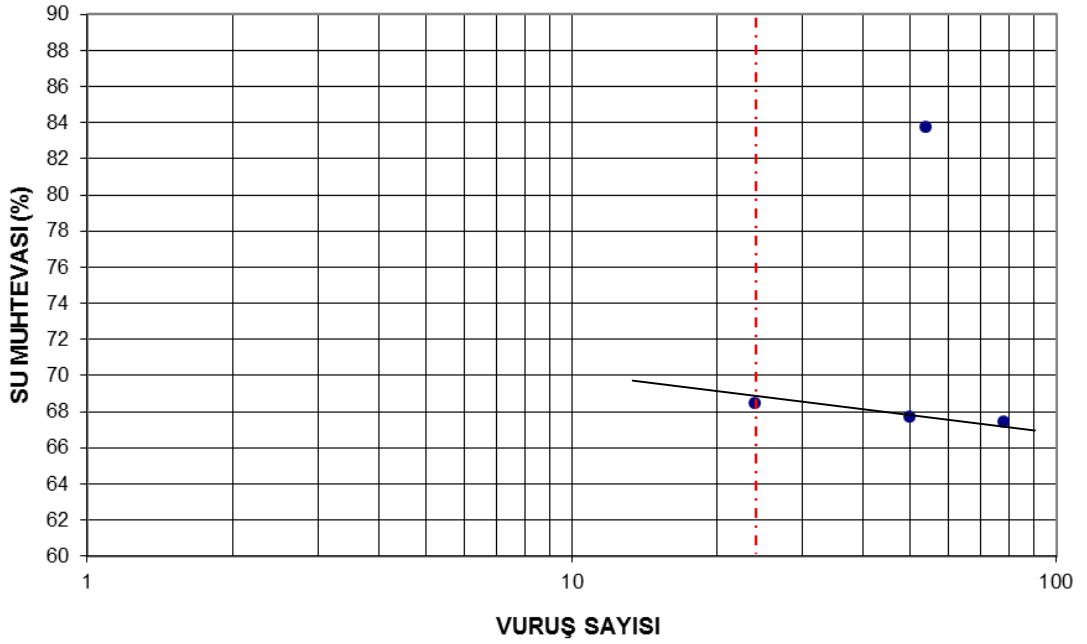
#### Ek.1.2. Numune 2 Deney Verileri



### Ek.1.3. Numune 3 Deney Verileri

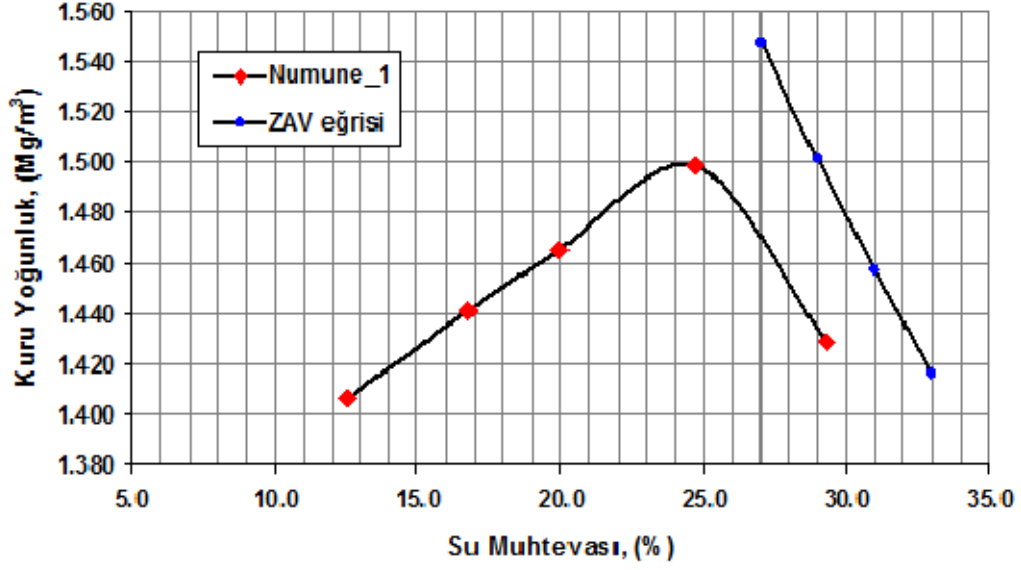


### Ek.1.4. Numune 4 Deney Verileri

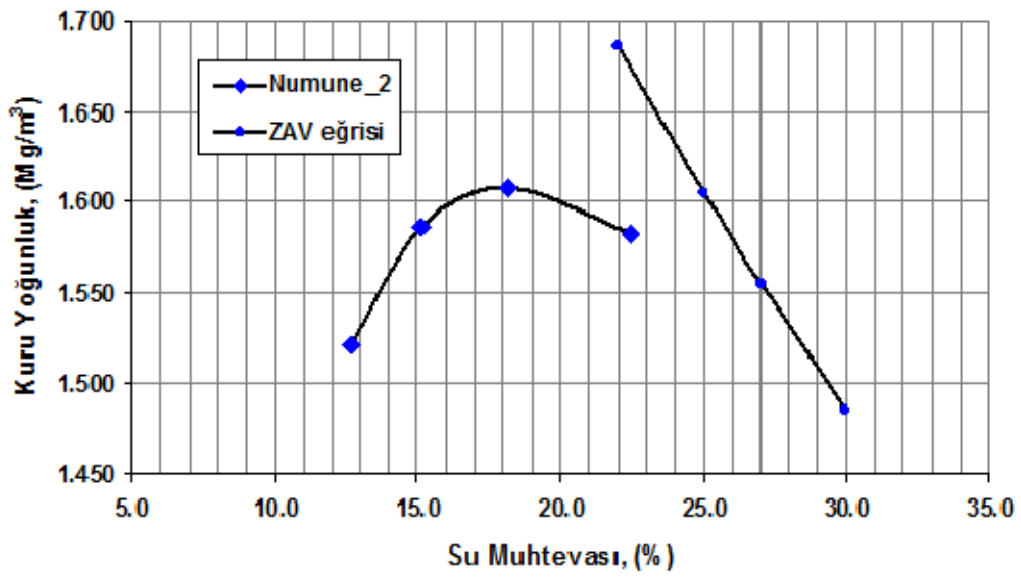


## Ek.2. Örneklerin Kompaksiyon Deney Sonuçları

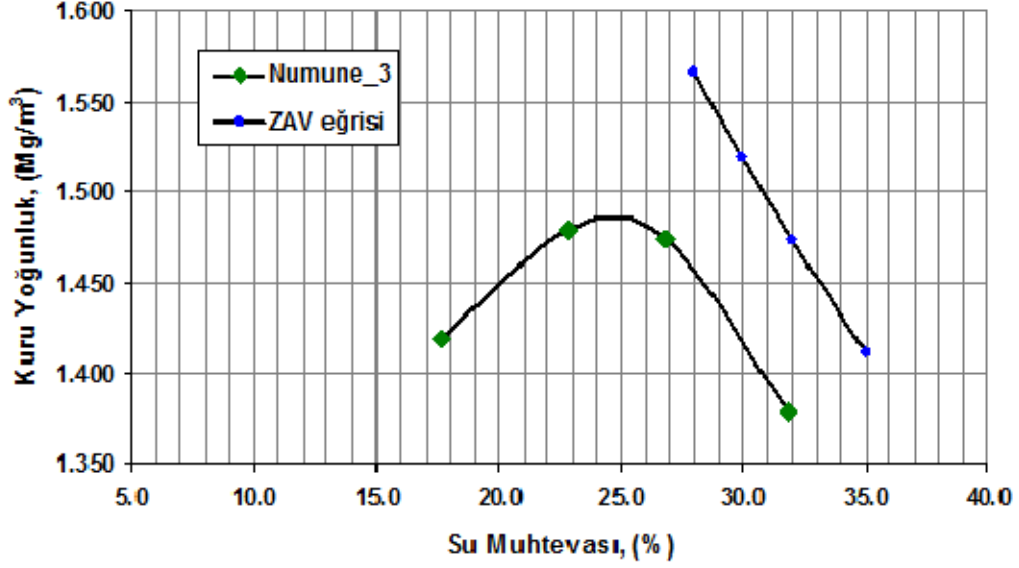
### Ek.2.1. Numune 1 Kompaksiyon Deney Verileri



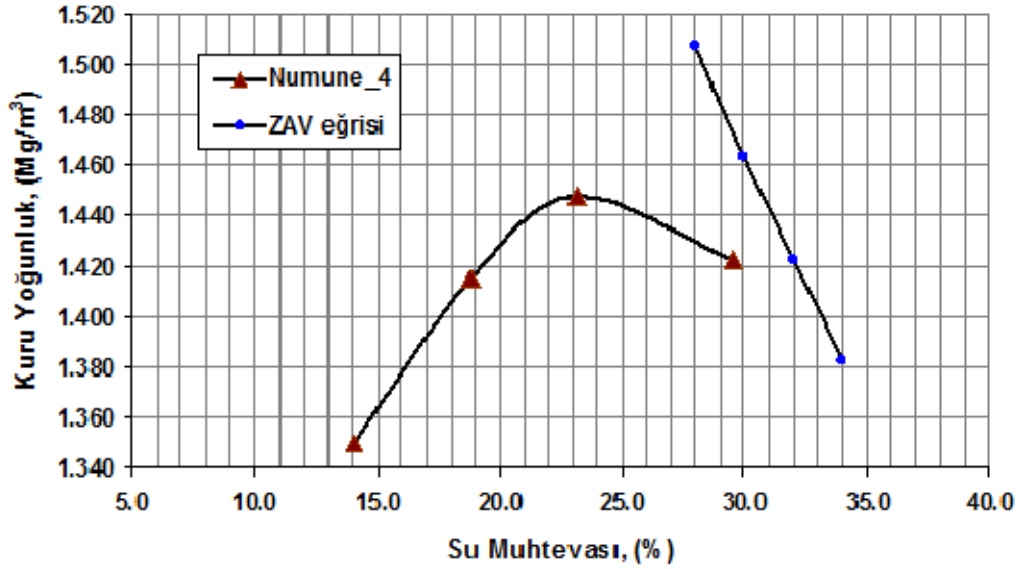
### Ek.2.2. Numune 2 Kompaksiyon Deney Verileri



### Ek.2.3. Numune 3 Kompaksiyon Deney Verileri



### Ek.2.4. Numune 4 Kompaksiyon Deney Verileri

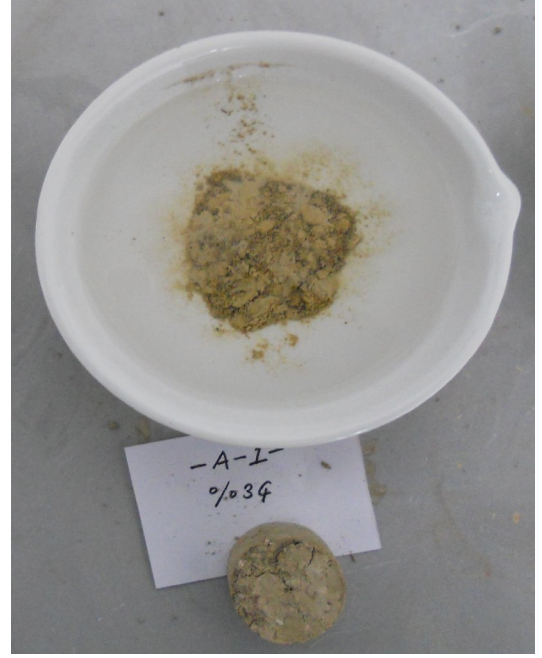


### Ek.3. Örneklerin Dağılma Deney Sonuçları

#### Ek.3.1. Numune 1'e ait Deney Sonuçları



**KATKISIZ**



**%3 ÇİMENTO**

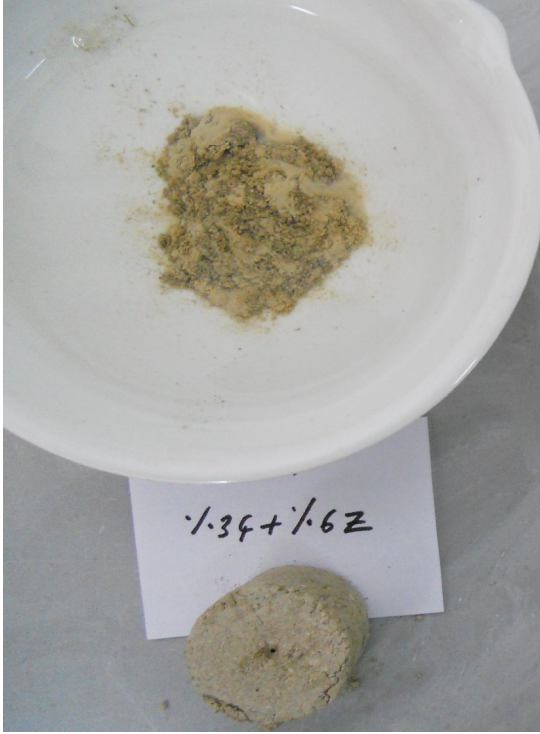


**%3 ÇİMENTO+%1 ZEOLİT**

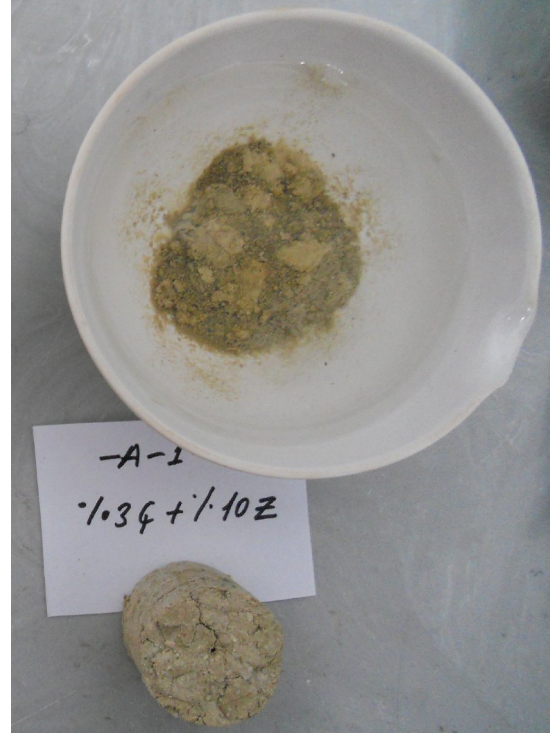


**%3 ÇİMENTO+%3 ZEOLİT**

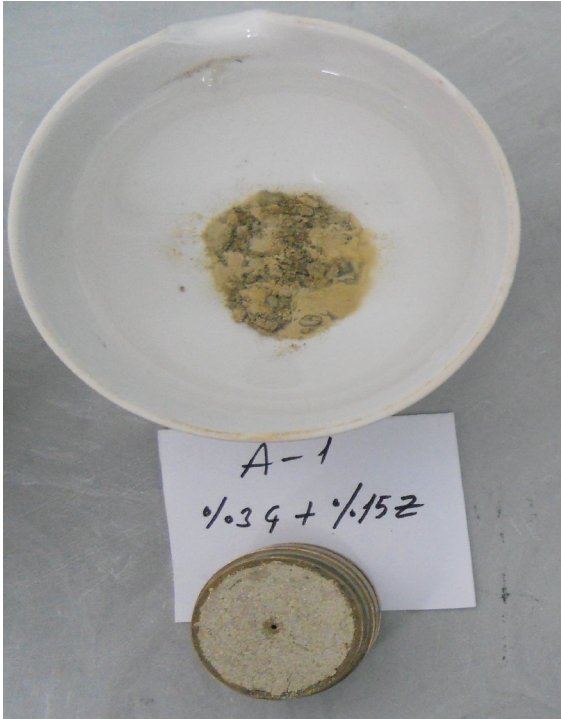




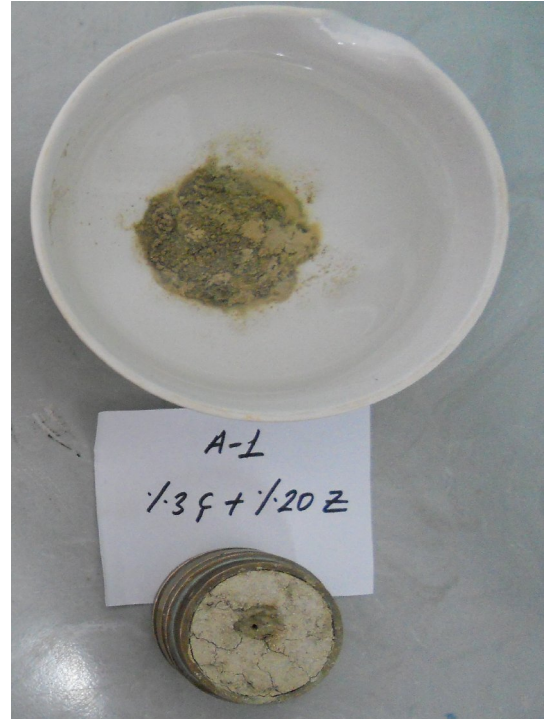
**%3 ÇİMENTO+%6 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%10 ZEOLİT**

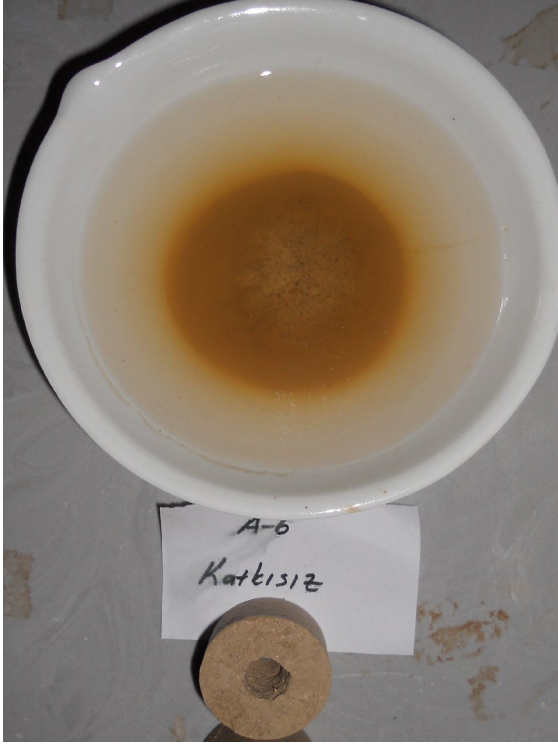


**%3 ÇİMENTO+%15 ZEOLİT**

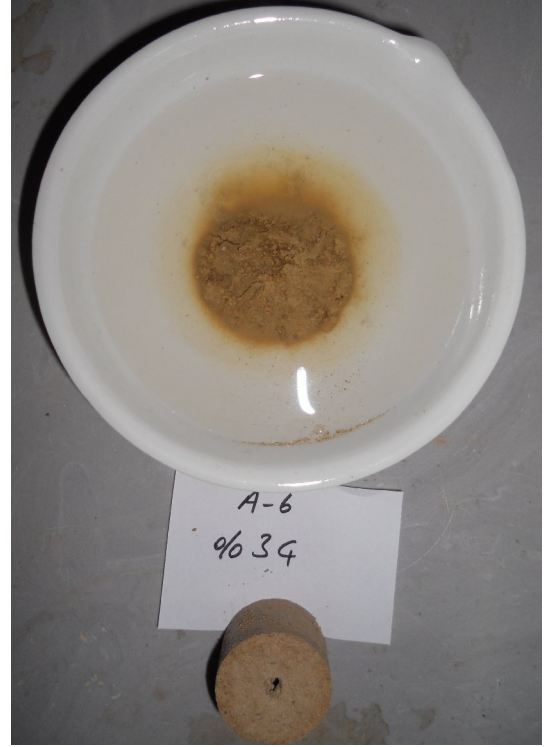


**%3 ÇİMENTO+%20 ZEOLİT**

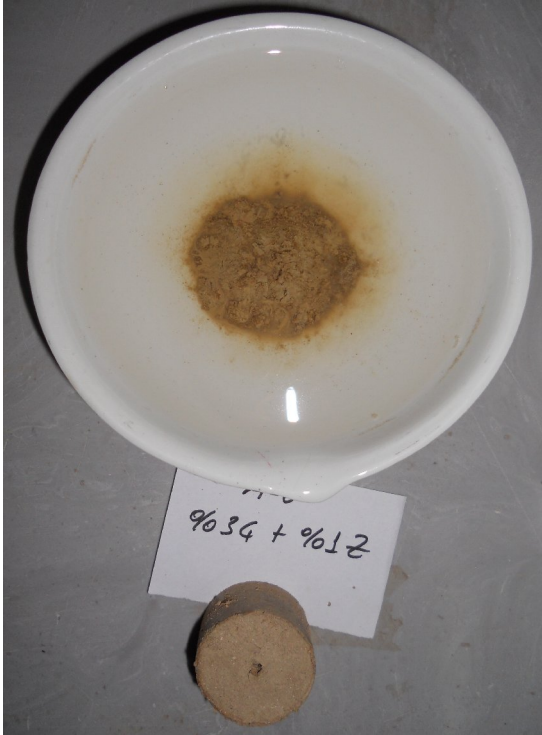
**Ek.3.2. Numune 2'ye ait Deneý Sonuları**



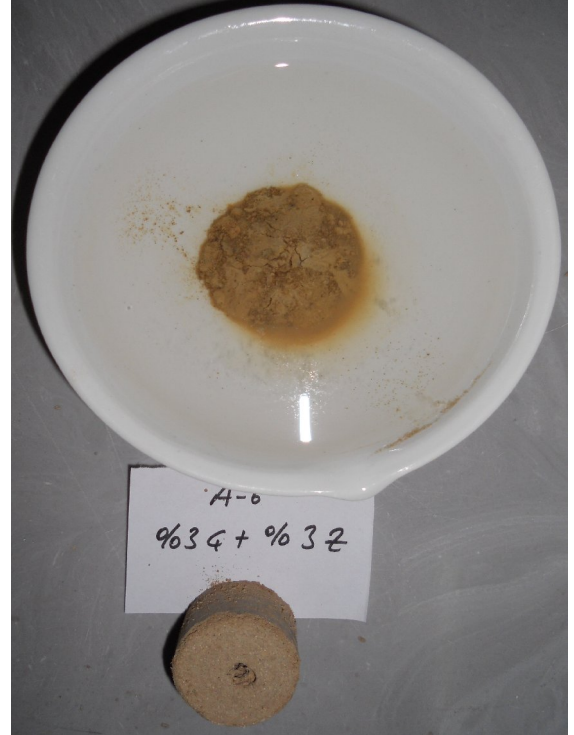
**KATKISIZ**



**%3 İMENTO**

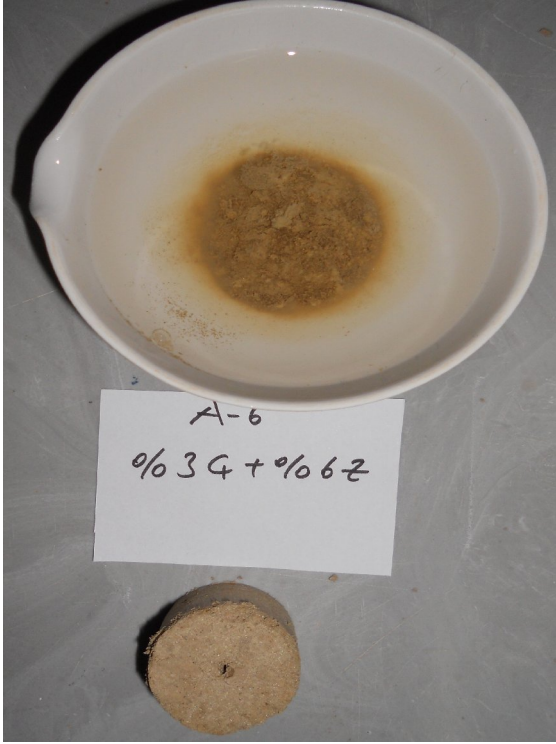


**%3 İMENTO+%1 ZEOLİT**

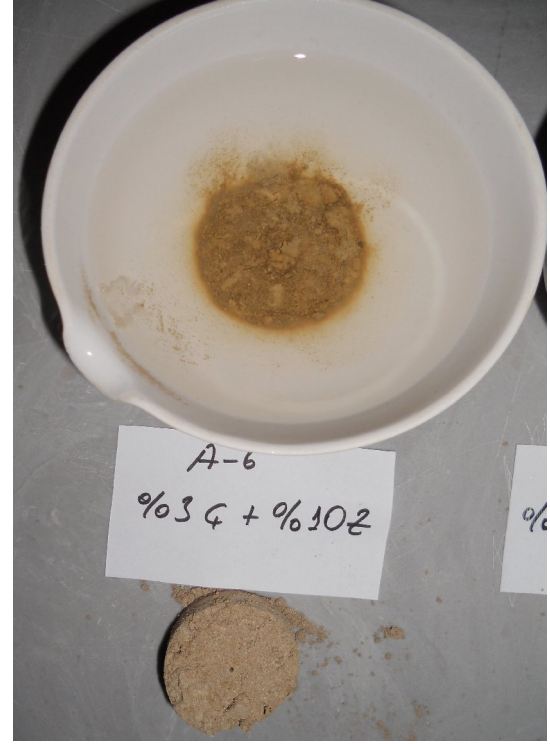


**%3 İMENTO+%3 ZEOLİT**

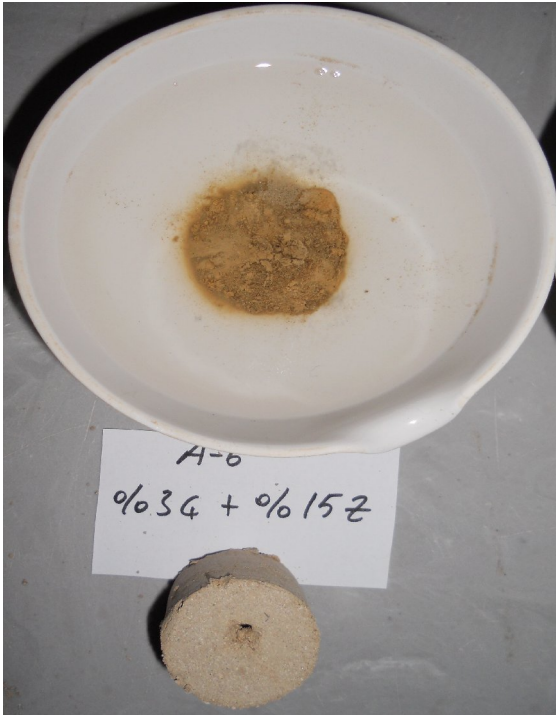




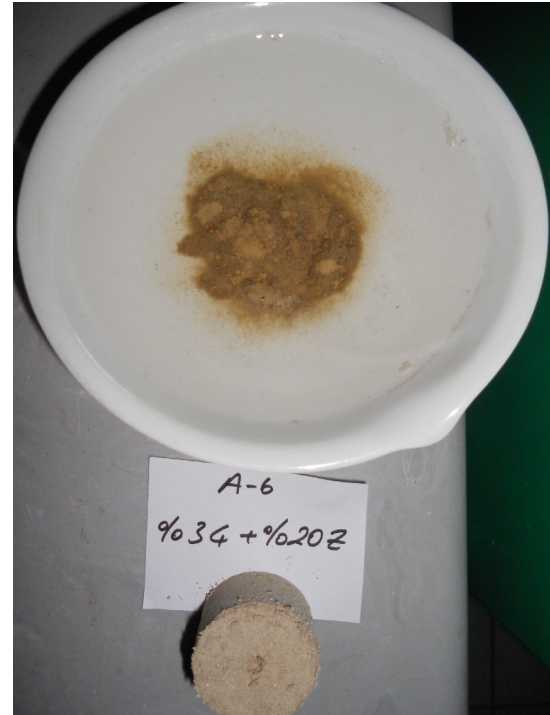
**%3 ÇİMENTO+%6 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%10 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%15 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%20 ZEOLİT**



**Ek.3.3. Numune 3'e ait Deneý Sonuları**



U-9  
Katkısız

**KATKISIZ**



U-9  
9034

**%3 İMENTO**



U-9  
9034 + 9012

**%3 İMENTO+%1 ZEOLİT**



U-9  
9034 + 9032

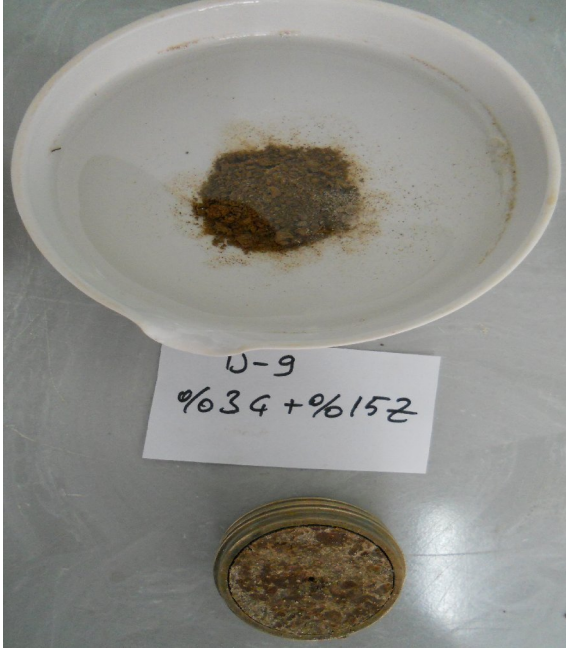
**%3 İMENTO+%3 ZEOLİT**



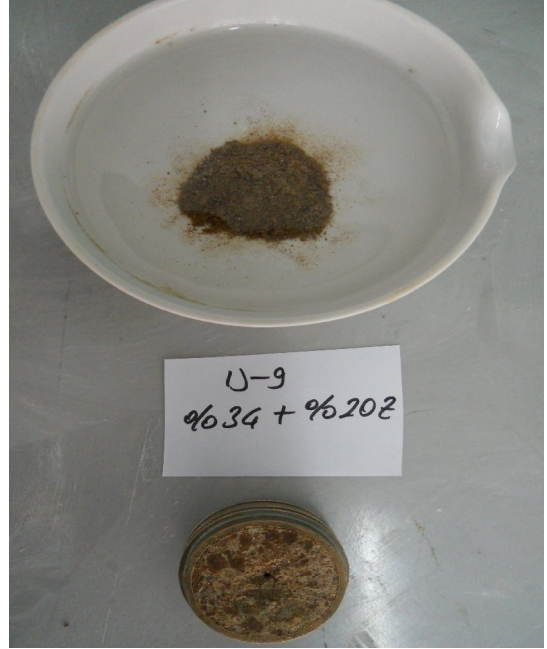
**%3 ÇİMENTO+%6 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%10 ZEOLİT**



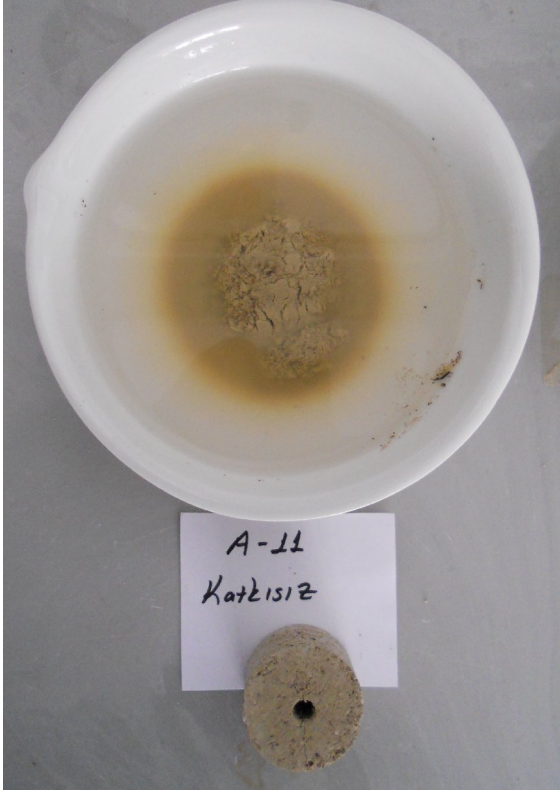
**%3 ÇİMENTO+%15 ZEOLİT**



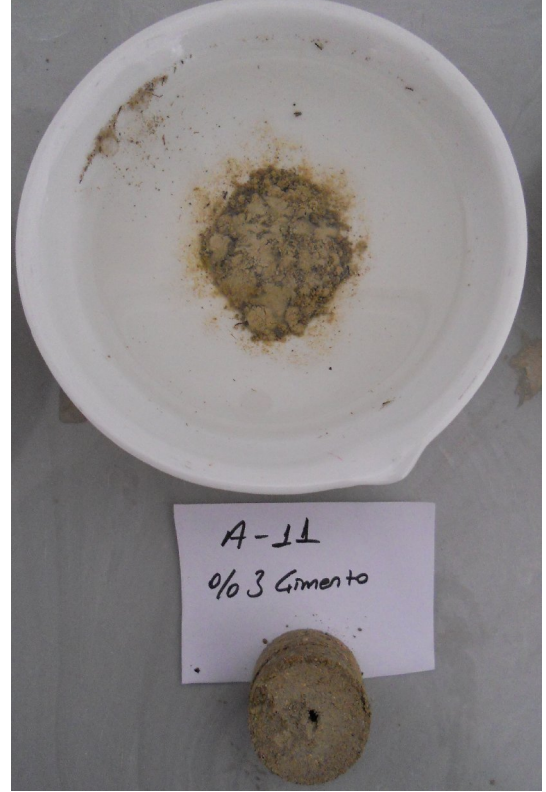
**%3 ÇİMENTO+%20 ZEOLİT**



**Ek.3.4. Numune 4'e ait Deneý Sonuları**



**KATKISIZ**



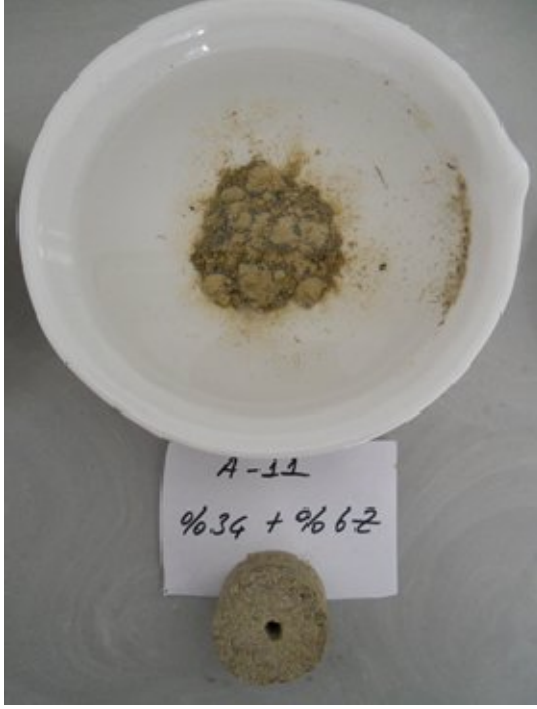
**%3 ÇİMENTO**



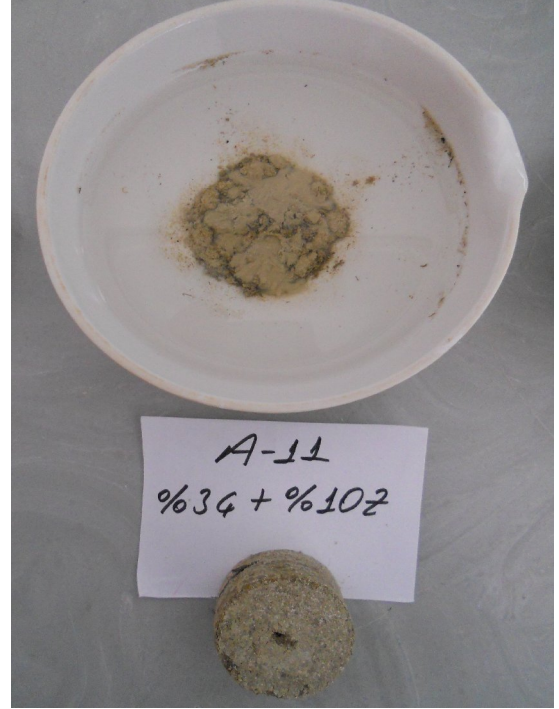
**%3 ÇİMENTO+%1 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%3 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%6 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%10 ZEOLİT**



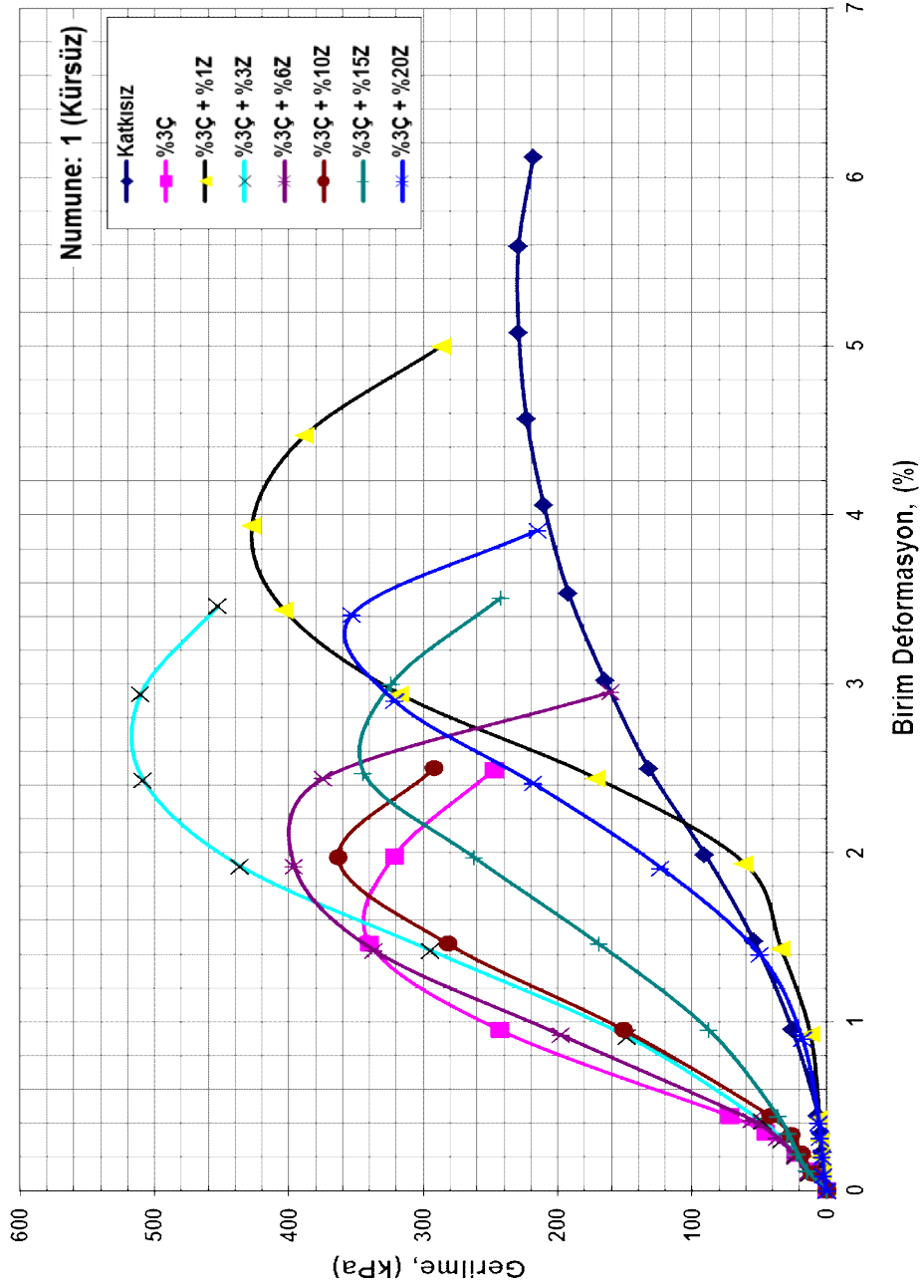
**%3 ÇİMENTO+%15 ZEOLİT**



**%3 ÇİMENTO+%20 ZEOLİT**

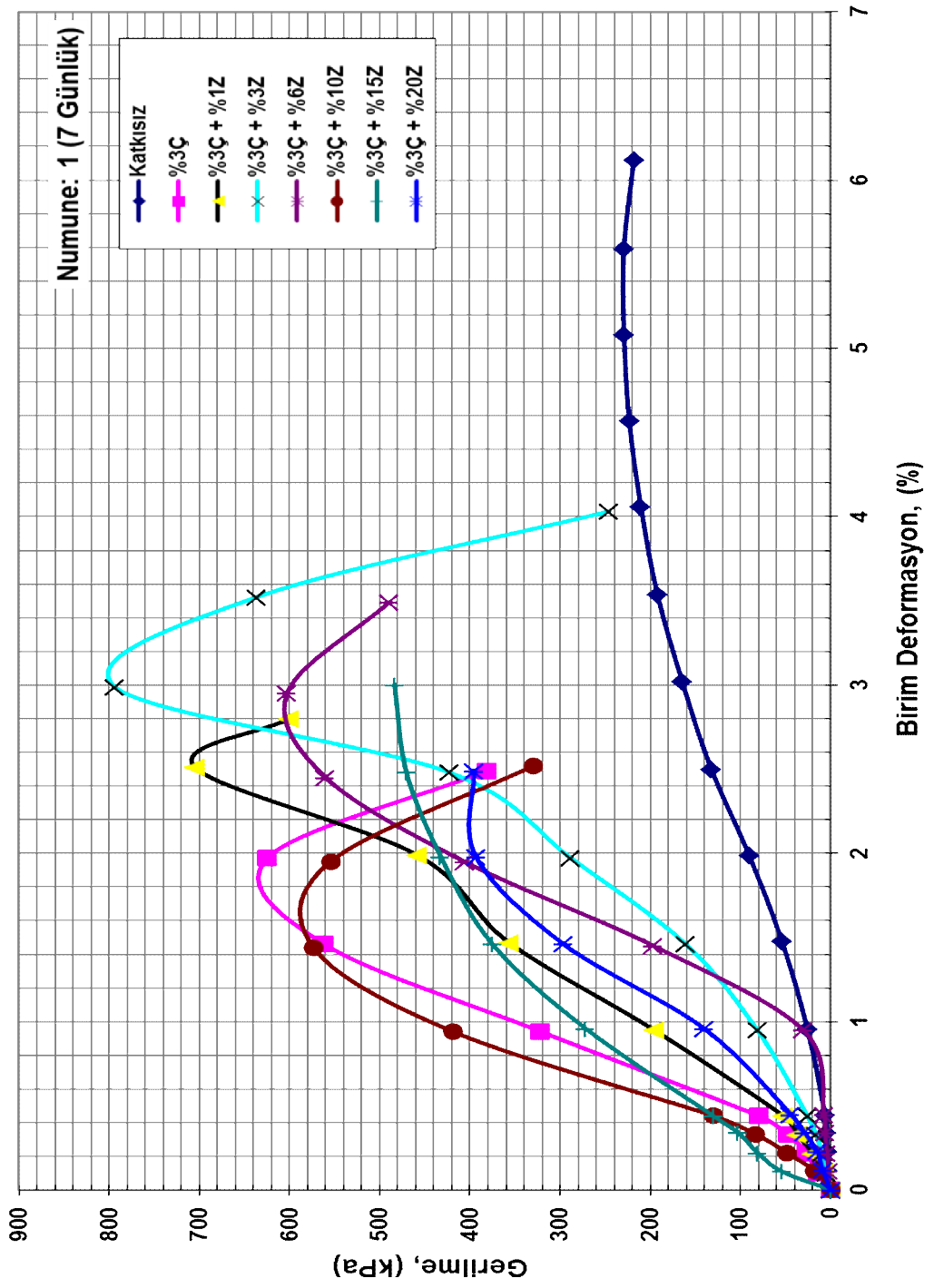
## Ek.4. Örneklerin Serbest Basınç Deney Sonuçları

### Ek.4.1. Numune 1 Deney Verileri

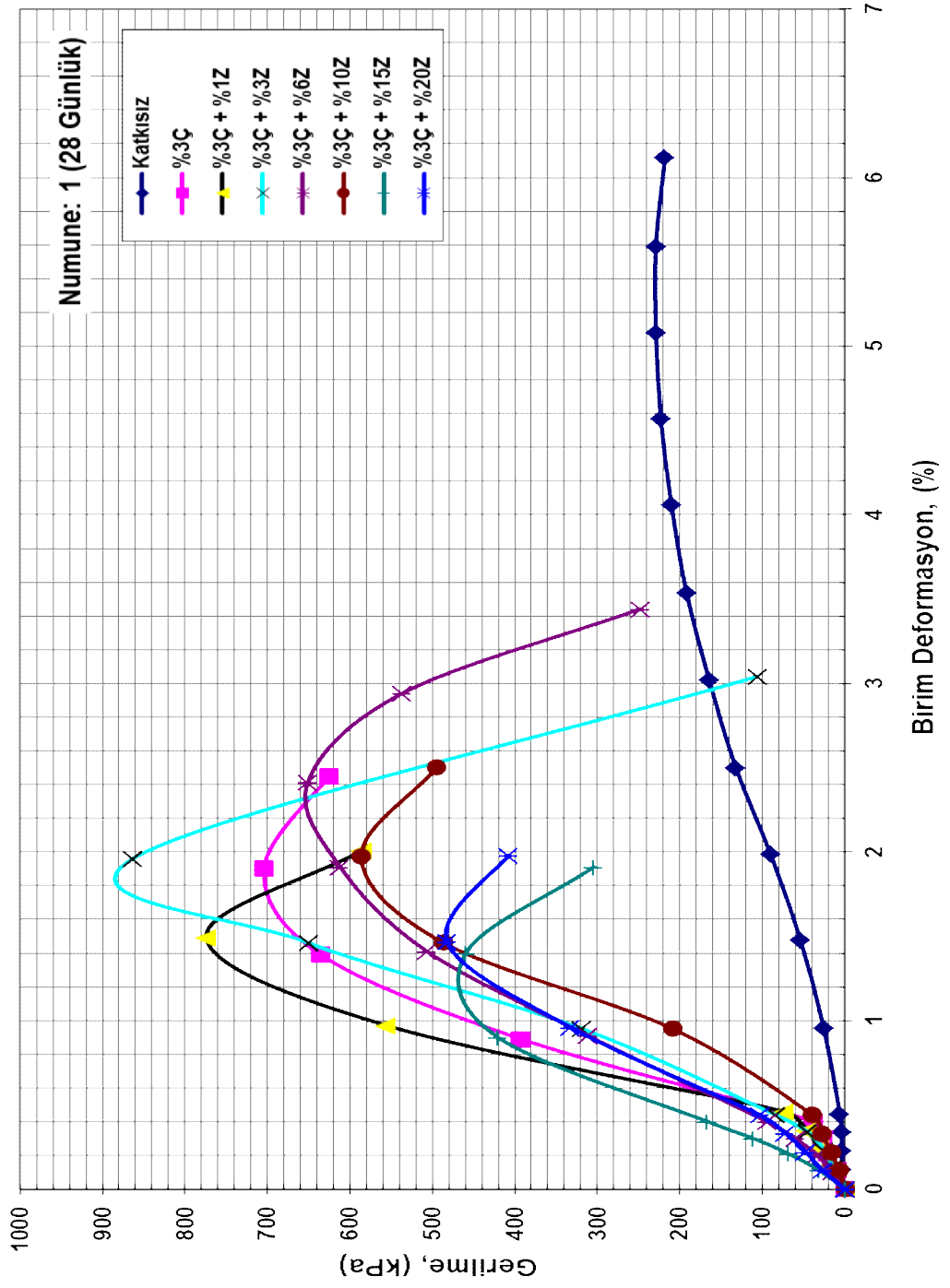


1 Günlük Kür Sonucu

## 7 Günlük Kür Sonucu

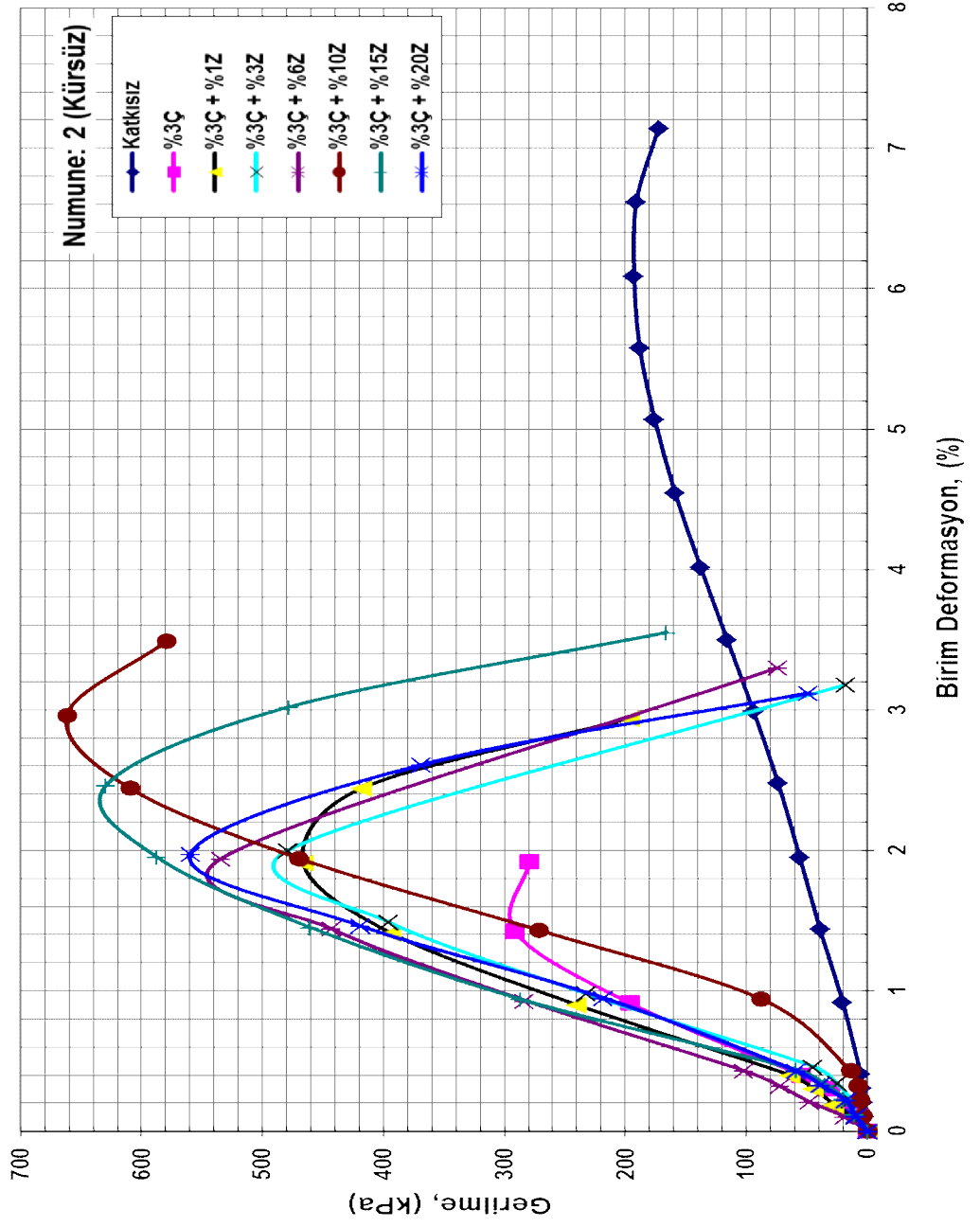






28 Günlük Kür Sonucu

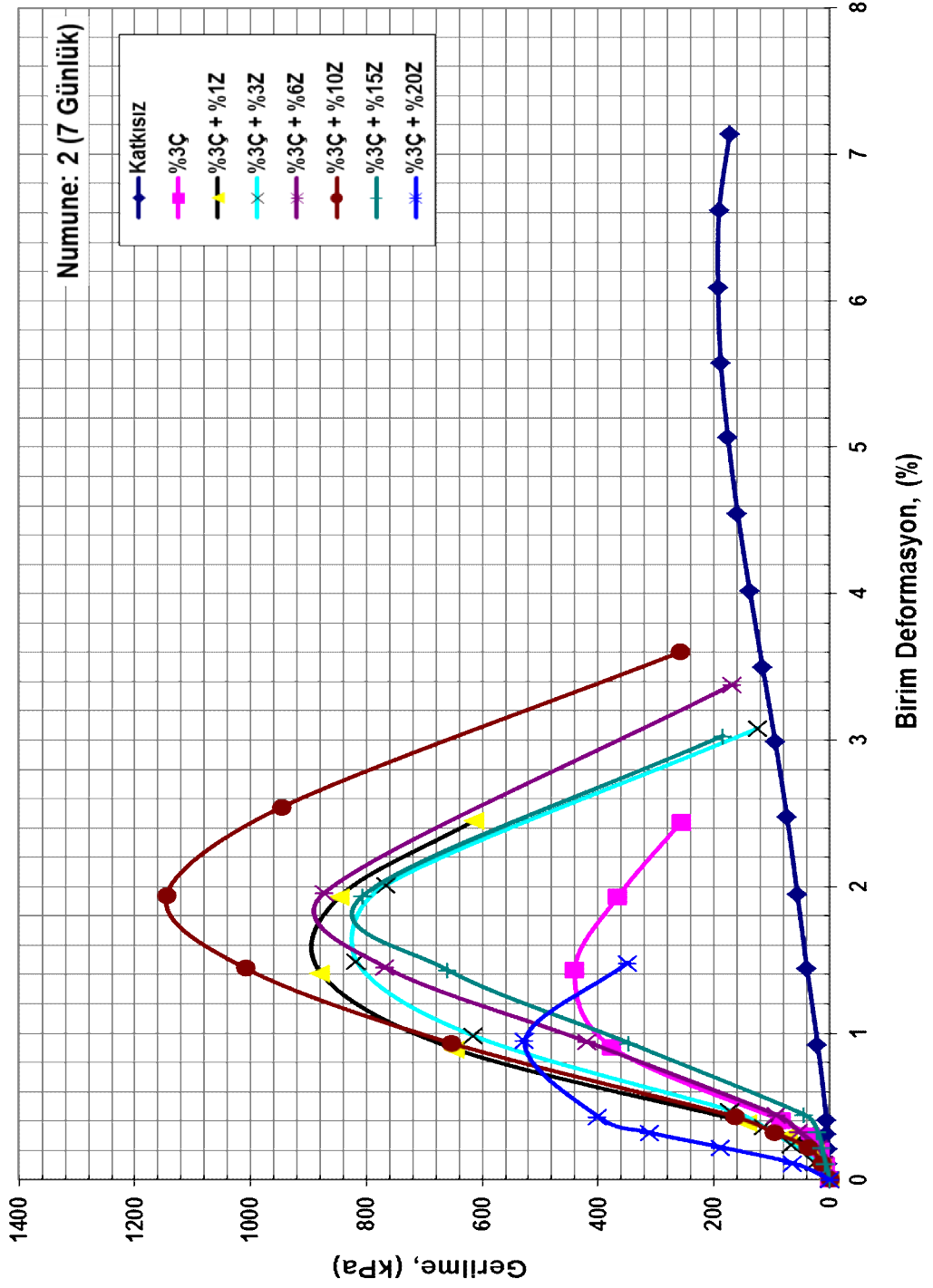
## Ek.4.2. Numune 2 Deney Verileri



1 Günlük Kür Sonucu

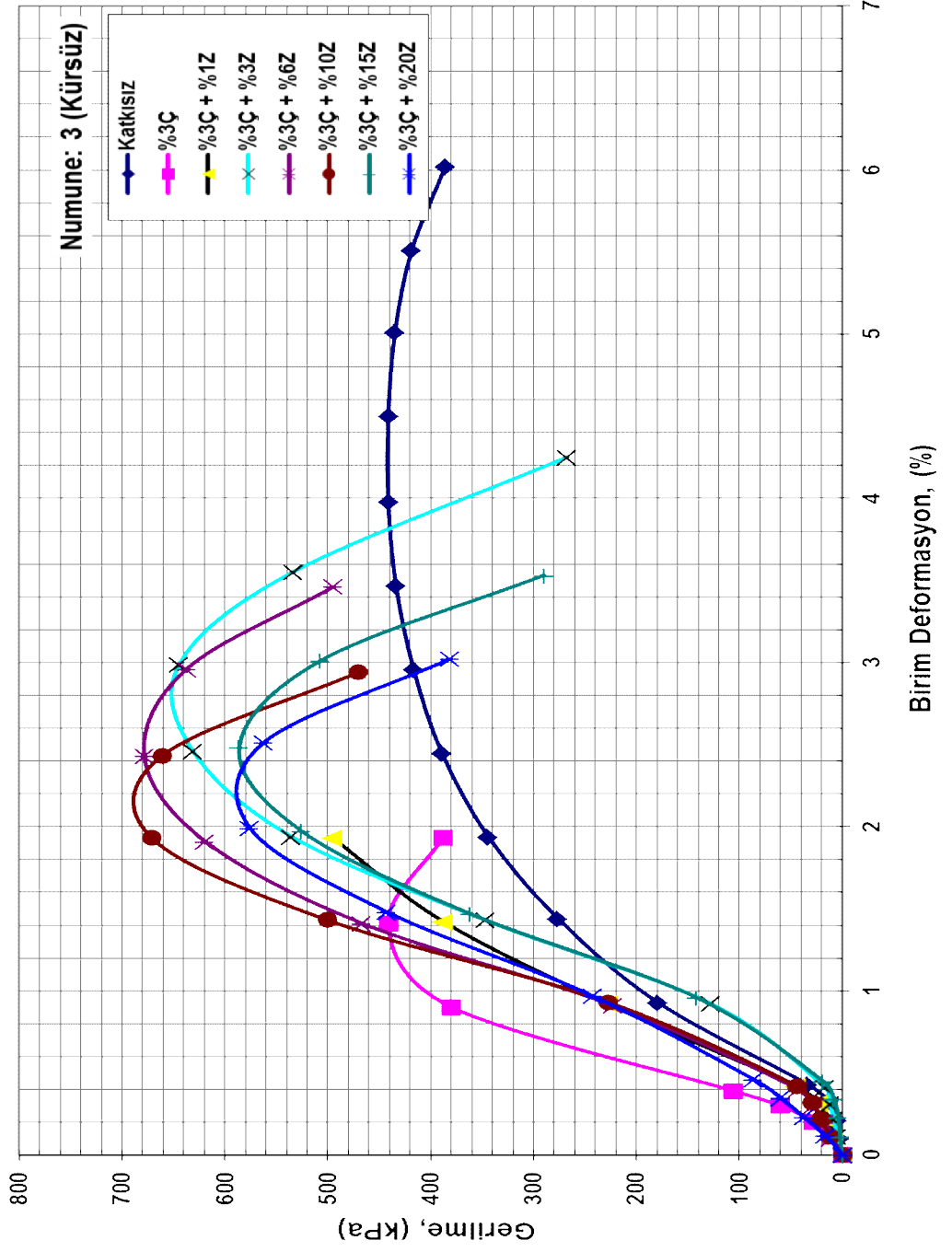


### 7 Günlük Kür Sonucu

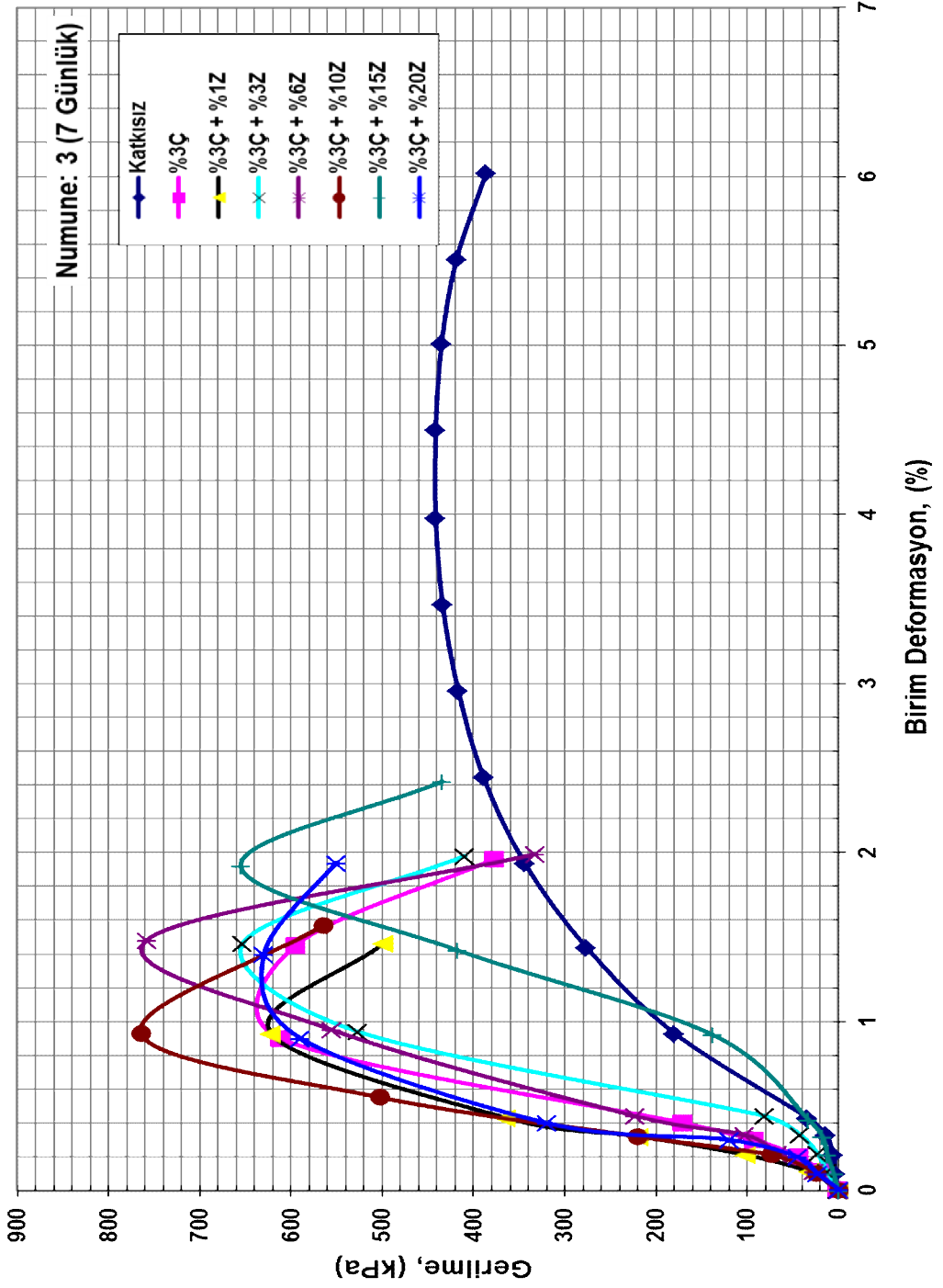




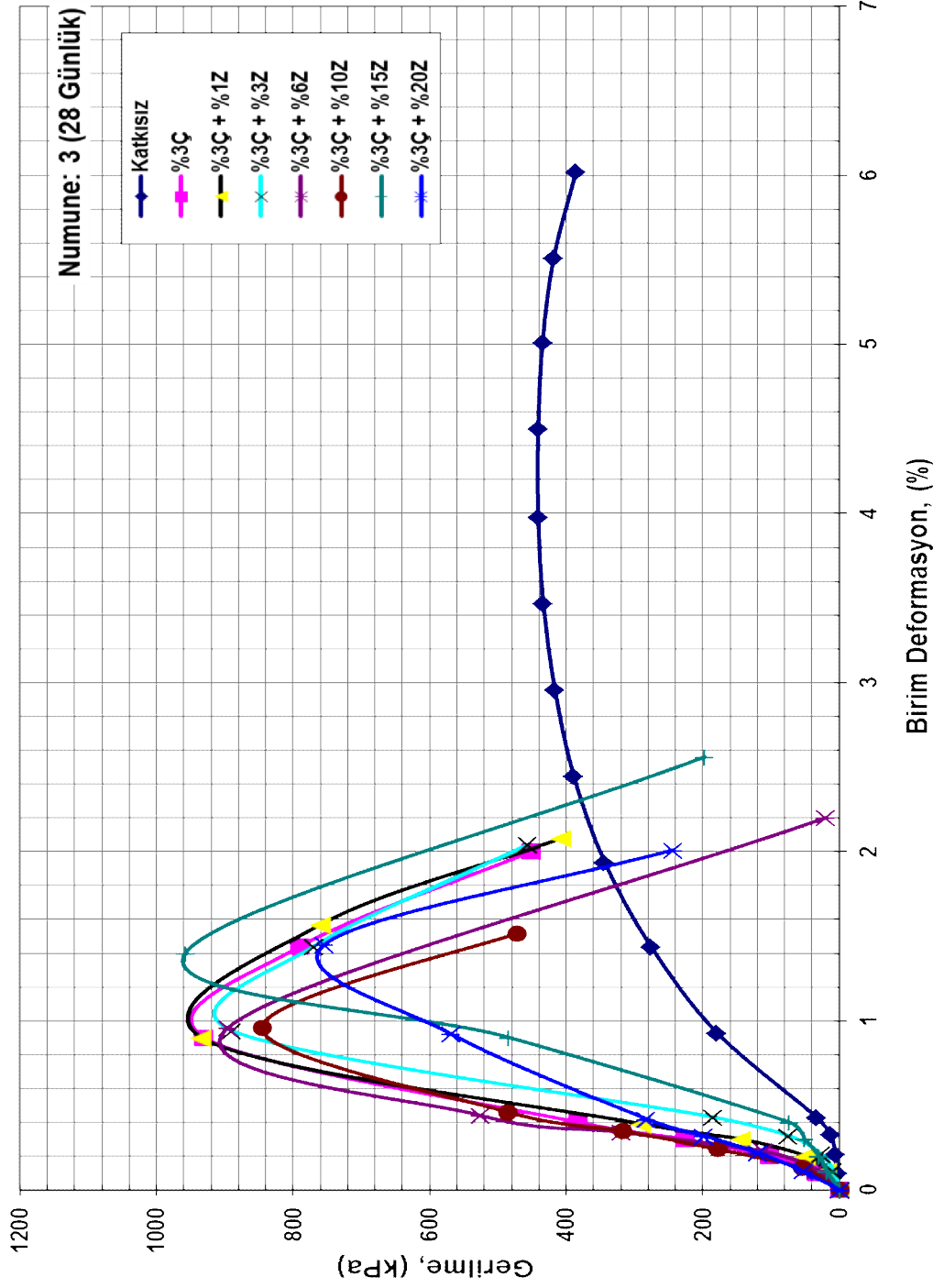
### Ek.4.3. Numune 3 Deney Verileri



1 Günlük Kür Sonucu

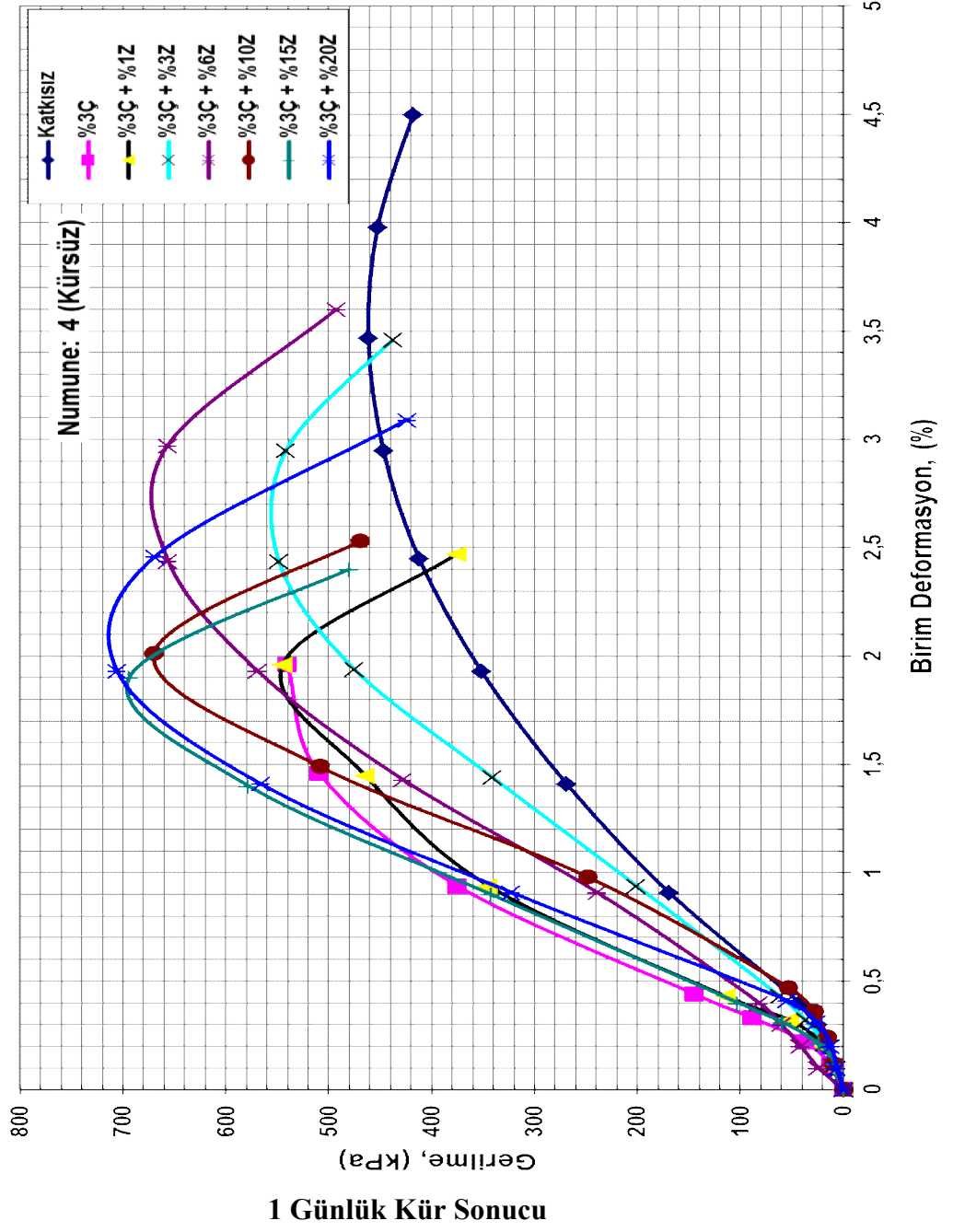


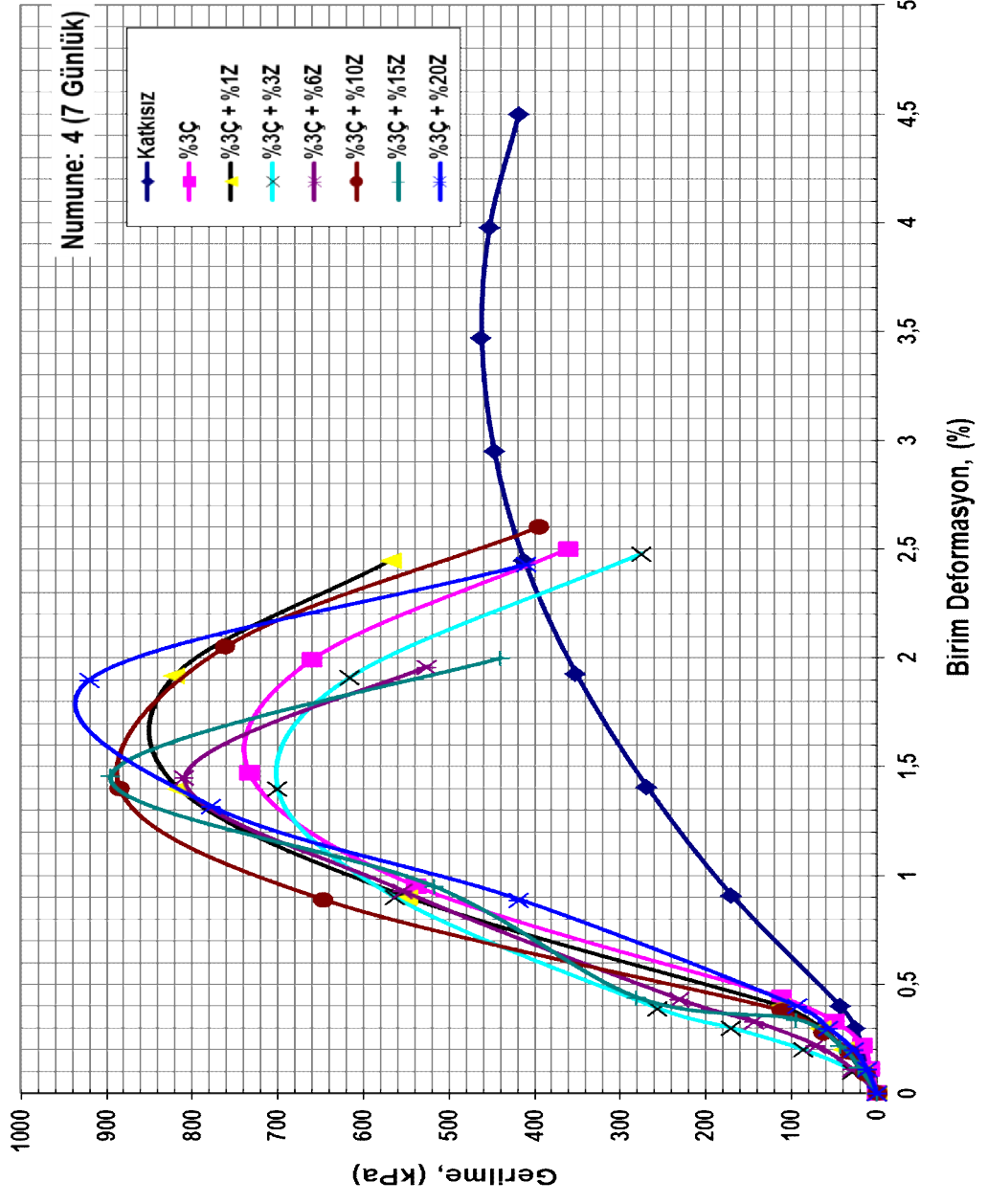
7 Günlük Kür Sonucu



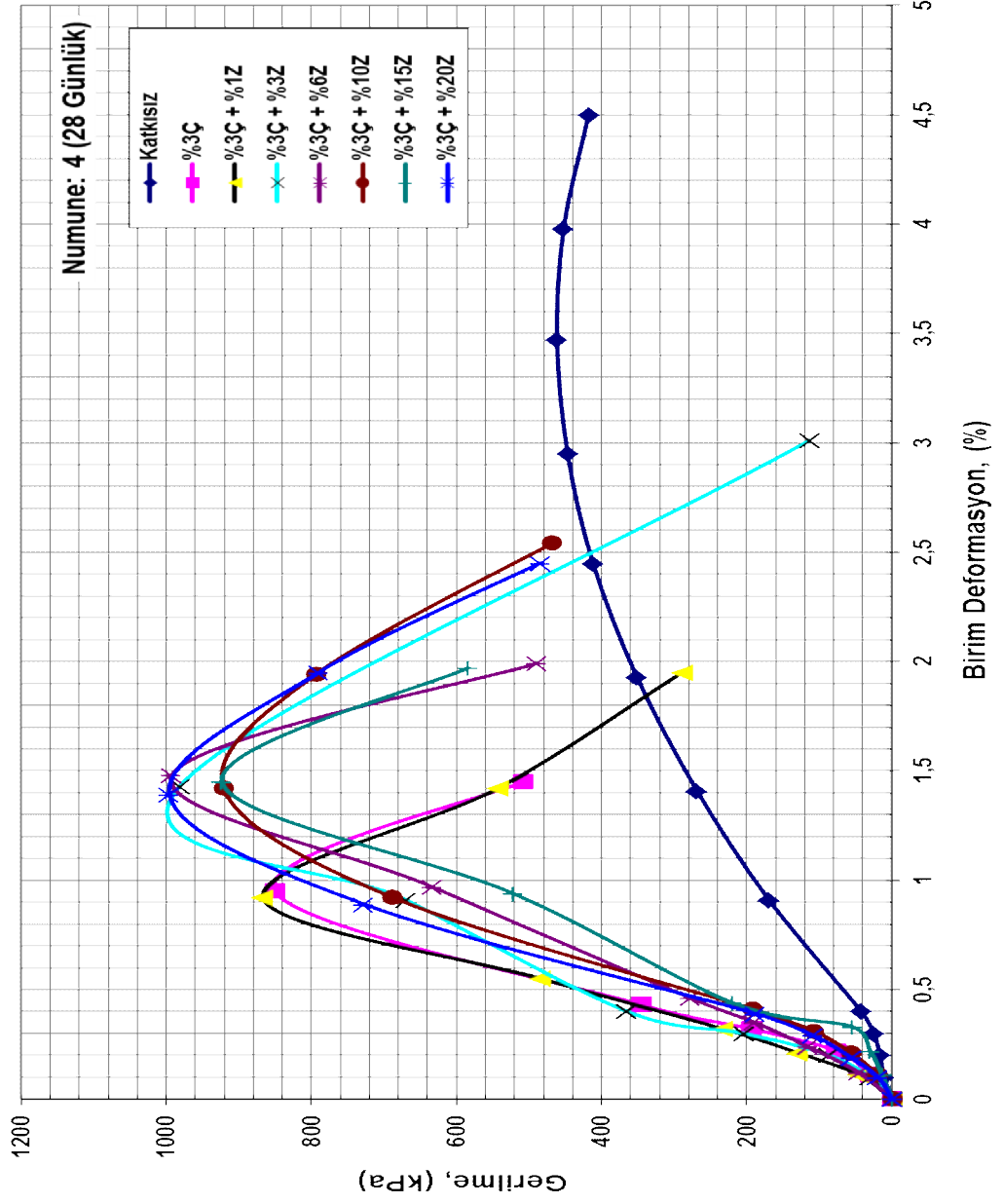
28 Günlük Kür Sonucu

#### Ek.4.4. Numune 4 Deney Verileri





7 Günlük Kür Sonucu



28 Günlük Kür Sonucu



**Ek.4.5. Numune 1'e ait serbest basınç deney sonu fotoğrafları**



**Ek.4.6. Numune 2'ye ait serbest basınç deney sonu fotoğrafları**



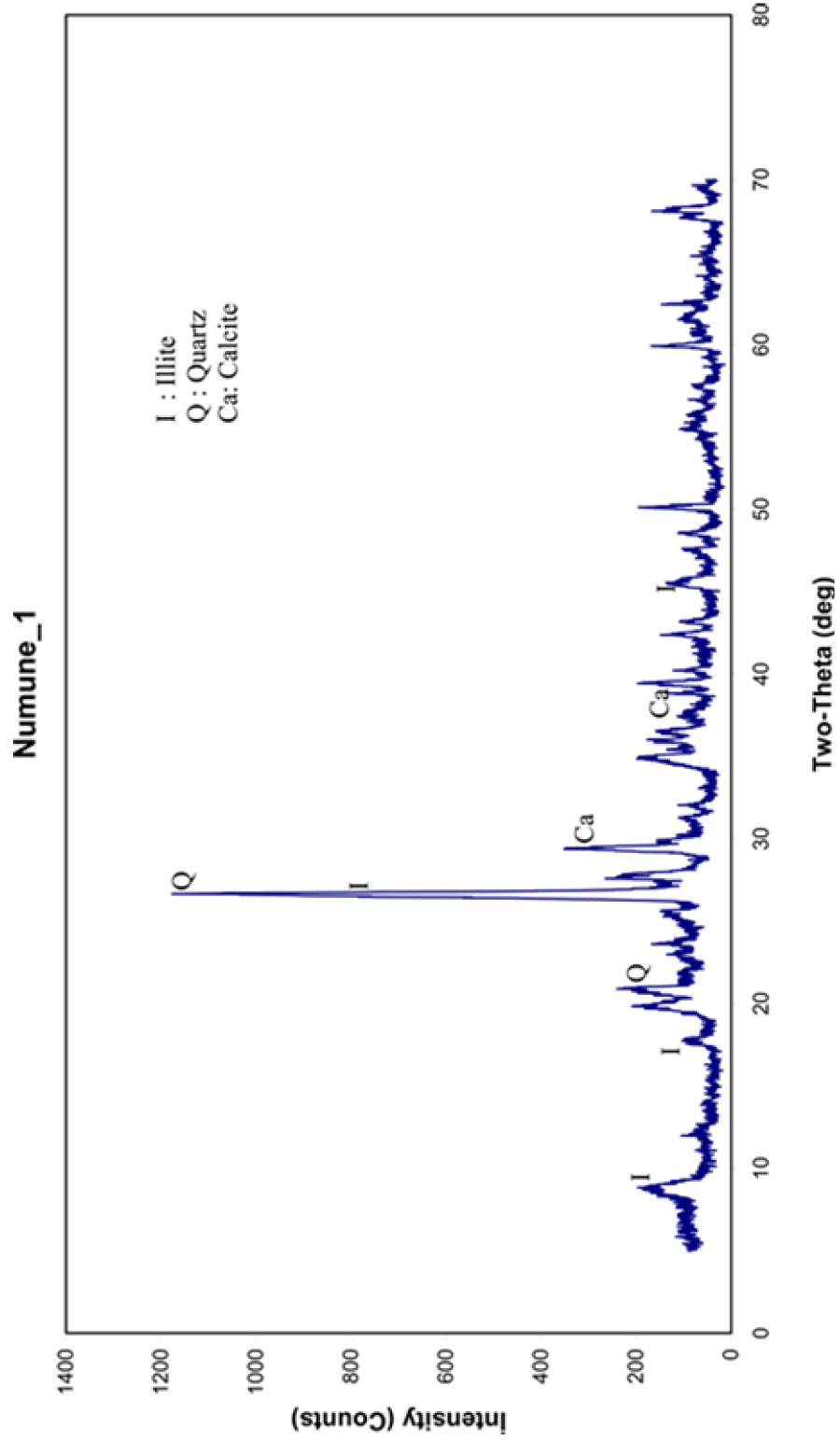
**Ek.4.7. Numune 3'e ait serbest basınç deney sonu fotoğrafları**



**Ek.4.8. Numune 4'e ait serbest basınç deney sonu fotoğrafları**

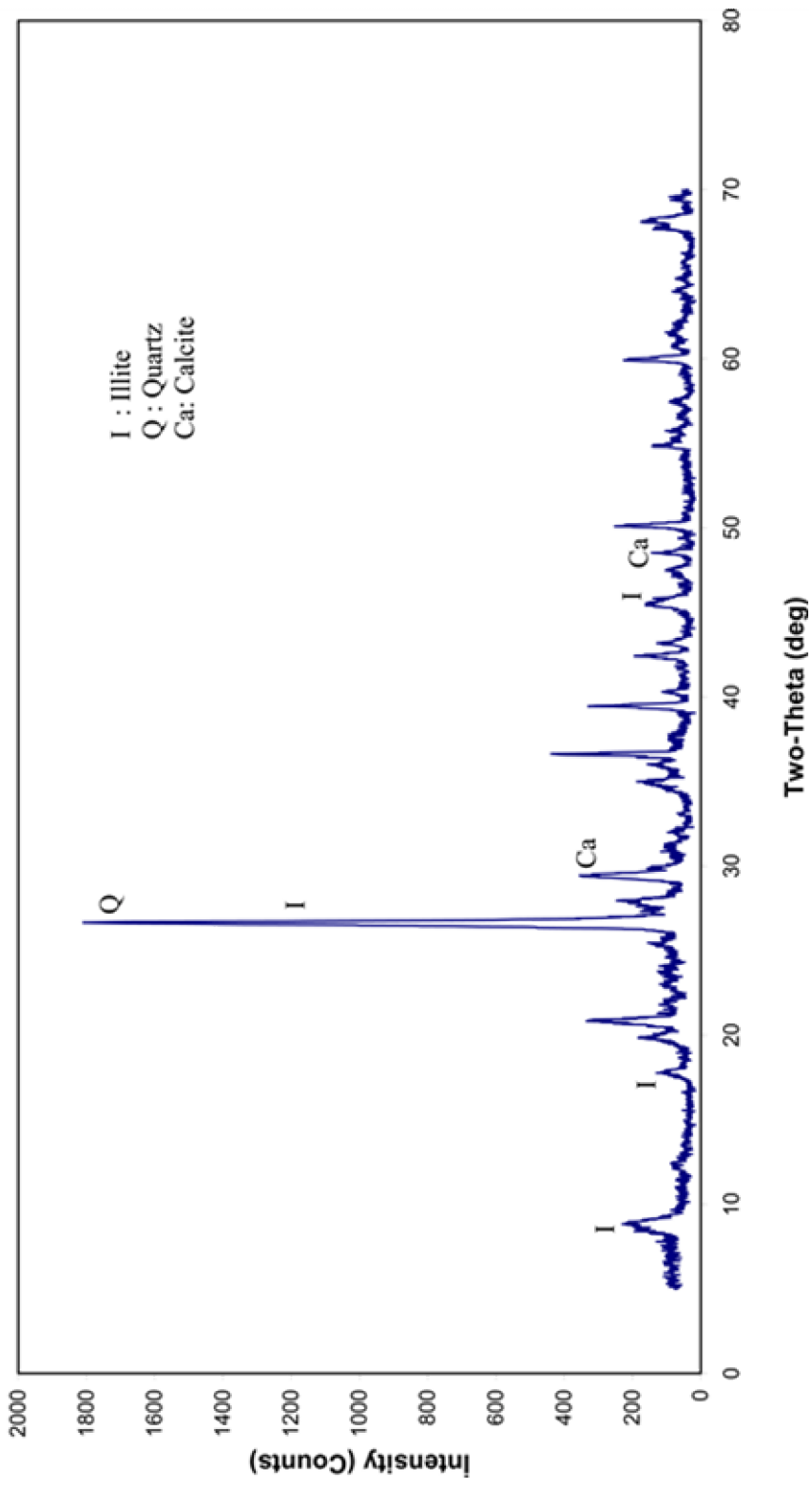


## Ek.5. Örneklerin XRD Deneş Sonuçları



Numune 1 için XRD Sonuçları

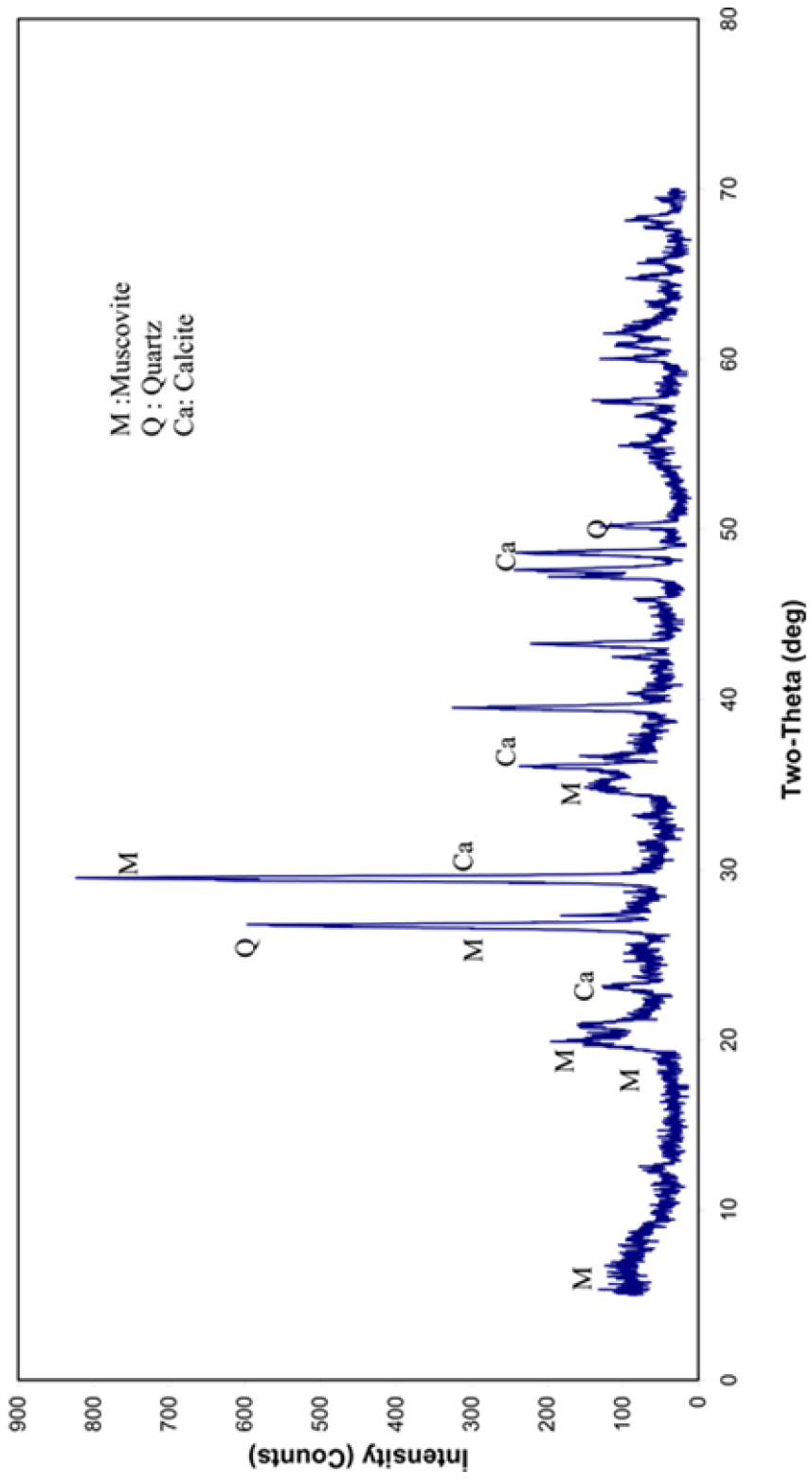
## Numune\_2



Numune 2 için XRD Sonuçları

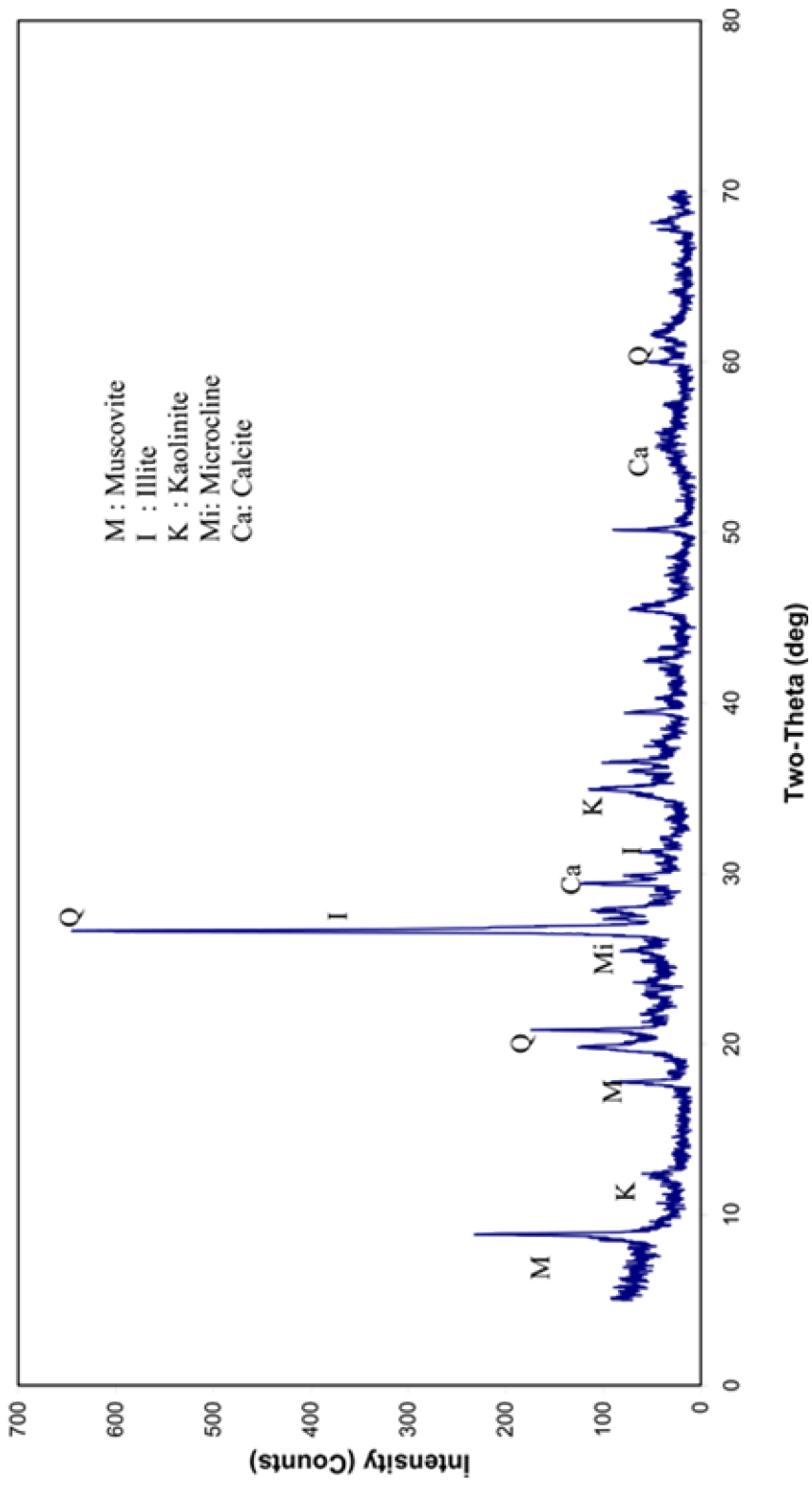


### Numune\_3



Numune 3 için XRD Sonuçları

### Numune\_4



Numune 4 için XRD Sonuçları